



Escola Tècnica Superior d'Enginyeries  
Industrial i Aeronàutica de Terrassa

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

**Máster Universitario en Ingeniería de la Organización**

## **Trabajo Final de Máster**

*Estudio de sistema de  
almacenaje de energía eléctrica.  
Tecnologías existentes y futuras.*

# **MEMORIA**

**Alumno:** Enrique Ruiz Valencia  
**Directores:** Beatriz Amante García

**Junio 2020**

***Estudio de sistema de almacenaje de  
energía eléctrica. Tecnologías existentes y  
futuras.***

*Enrique Ruiz Valencia*  
*Máster Universitario Ingeniería de la Organización*

*Junio de 2020*



Escola Tècnica Superior d'Enginyeries  
Industrial i Aeronàutica de Terrassa

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## ÍNDICE GENERAL

### Tabla de contenido

1.- INTRODUCCIÓN .....	9
1.1.- OBJETO .....	9
1.2.- ALCANCE.....	9
1.3.- ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....	9
1.4.- JUSTIFICACIÓN. ....	10
2.- INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS ACTUALES.....	12
2.1.- CENTRALES HIDROÉLECTRICAS REVERSIBLE .....	14
2.2.- ALMACENAMIENTO DE AIRE COMPRIMIDO .....	16
2.3.- ALMACENAMIENTO TERMICO.....	19
2.4.- SUPERCONDUCTORES MAGNETICOS.....	20
2.5.- SUPERCONDENSADORES .....	22
2.6.- VOLANTES DE INERCIA.....	24
2.7.- PILAS DE COMBUSTIBLES DE HIDROGENO. ....	26
2.8.- PILAS Y BATERÍAS. ....	28
2.8.1. BATERÍA PLOMO ACIDO.....	30
2.8.2 BATERÍA SODIO- AZUFRE. ....	31
2.8.3 BATERÍA NIQUEL – CADMIO Y NÍQUEL-HIDRURO METÁLICO .....	33
2.8.4. BATERÍA ZINC- AIRE. ....	33
2.8.5. BATERÍA DE LITIO .....	35
3.8.5.1. Óxido de cobalto-Litio. ( $\text{LiCoO}_2$ ) .....	37
2.8.5.2. Óxido de magnesio-litio ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ).....	39
3.8.5.3. Fosfato Hierro-Litio ( $\text{LiFePO}_4$ ). ....	40
2.8.5.4. Óxido de Cobalto-Magnesio-Níquel-Litio ( $\text{LiNiMnCoO}_2$ ). ....	41
2.8.5.5. Óxido de Aluminio-Cobalto-Níquel-Litio ( $\text{LiNiCoAlO}_2$ ).....	41
2.8.5.6. Óxido de Titanio-Litio ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ).....	42
2.8.6 BATERÍA DE FLUJO. ....	43
2.8.6.1. Baterías de flujo zinc-bromo. ....	45
2.8.6.2. Batería de flujo redox de Vanadio.....	46
3. COMPARATIVA .....	48
3.2.- ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE PUBLICACIONES.....	56
4 – ANALISIS DETALLADO BATERÍAS ION-LITIO .....	59
5 – TECNOLOGIAS FUTURAS .....	61
6 – CONCLUSIONES.....	63
7 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	64
7.1.- PUBLICACIONES .....	64

## An Overview of SMES Applications in Power and Energy Systems..¡Error! Marcador no definido.

7.2.- WEBS.....	67
7.3.- VÍDEOS .....	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Generación energética peninsular el 23/01/2020 a las 11:40 . Ree.es. ....	11
Figura 2.- Central hidroeléctrica reversible. Fuente: ree.es .....	15
Figura 3 - Esquema de almacenamiento de energía con aire comprimido. Fuente: Pontificia Universidad Católica de Chile.....	17
Figura 4 - Central CAES con energía potencial del agua. Fuente: Revista RD Energía .....	18
Figura 5 .- Diseño de sistema de almacenamiento de energía (SMES) <a href="https://www.researchgate.net/">https://www.researchgate.net/</a> .....	21
Figura 6.- Supercondensadores. Fuente: (Chen et al. 2009a).....	22
Figura 7.- grafico de descarga de un Supercondensadores. Fuente: (Los Supercondensadores Y Su Viabilidad Como Sistema De, Clara Pérez Lobo Tutor, and Isidoro Lillo Bravo n.d.) .....	23
Figura 8.- grafico de carga de un Supercondensadores. Fuente: (Los Supercondensadores Y Su Viabilidad Como Sistema De, Clara Pérez Lobo Tutor, and Isidoro Lillo Bravo n.d.) .....	23
Figura 9.- Sistema de volante de inercia. Fuente: (Chen et al. 2009a).....	25
Figura 10.- Pila de combustible de hidrogeno sistema de volante de inercia. Fuente: Wikipedia .....	27
Figura 11.- esquema de una batería de plomo acido. (labateriadeplobo.blogspot.com) .....	30
Figura 12.- Esquema de una batería sodio azufre. [15], [16](Ana Barbón Núñez UNIVERSIDAD DE OVIEDO Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Página 2 de 118 Índice n.d.), .....	32
Figura 13- Esquema de un batería Zinc aire. [15](Ana Barbón Núñez UNIVERSIDAD DE OVIEDO Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Página 2 de 118 Índice n.d.)	34
Figura 14- Esquema de carga y descarga baterías Zinc aire. [10](Chen et al. 2009b)	35
Figura 15 - Esquema de batería de ion de litio. [15] (Ana Barbón Núñez UNIVERSIDAD DE OVIEDO Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Página 2 de 118 Índice n.d.) .....	36
Figura 16- Esquema de batería de ion de $\text{LiCoO}_2$ , [19] (Fisher et al. 2014).....	38
Figura 17- Esquema de la estructura del cátodo de una batería $[\text{LiMn}]_{0.5}\text{O}_2$ (Fisher et al. 2014).....	39

Figura 18- Esquema de la estructura del cátodo de una batería LiFe [PO] $_4$ [19] (Fisher et al. 2014).....	40
Figura 19- Esquema de la estructura del cátodo de una batería LTO [21](Zhu, Wang, and Xia 2012). ....	42
Figura 20- Esquema de una batería de flujo redox [23](Weber et al. n.d.)..	44
Figura 21- Funcionamiento de una batería redox zinc – bromo [24] (Hernández Romero and para Almacenamiento de Energía n.d.) .....	45
Figura 22- Funcionamiento de una batería redox vanadio [15] (Ana Barbón Núñez UNIVERSIDAD DE OVIEDO Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Página 74 de 118 Índice, n.d.) .....	47

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Algunos ejemplos de centrales españolas .....	15
Tabla 2- Matriz DAFO centrales de bombeo .....	16
Tabla 3- Matriz DAFO centrales de almacenamiento de aire comprimido.....	19
Tabla 4- Matriz DAFO centrales de almacenamiento térmico. ....	20
Tabla 5- Matriz DAFO superconductores magnéticos.....	21
Tabla 6 - Matriz DAFO supercondensadores. ....	24
Tabla 7- Matriz DAFO volantes de inercia.....	25
Tabla 8.-Principales tipos de pila de combustible y sus principales características. ....	26
Tabla 9-Principales tipos de baterías de ion-litio y principales características. [15].....	43
Tabla 10 - Características técnicas de las diferentes tecnologías de las baterías de flujo [15].....	48
Tabla 11 .-Características de los diferentes sistemas de almacenamiento nombrados [25] (Sabihuddin, Kiprakis, and Mueller 2014).....	50
Tabla 12- Características de los s sistemas de almacenamiento aptos para aplicaciones móviles y con bajo impacto ambiental [25] (Sabihuddin, Kiprakis, and Mueller 2014).....	52
Tabla 13- Tabla 13.-Costes de los s sistemas de almacenamiento [25] (Sabihuddin, Kiprakis, and Mueller 2014) .....	54
Tabla 14.-posibilidad de aplicación de los sistemas de almacenamiento. ....	56

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfico 1.-Evolución del parque de vehículos eléctricos en España.	
<a href="http://www.evobsevatary.iit.comillas.edu">www.evobsevatary.iit.comillas.edu</a> .....	12
Gráfico 2.- Áreas de aplicación de cada tecnología. Fuente: [6] .....	49
Gráfico 3.- Publicaciones anuales por sistema de almacenamiento de energía .....	57
Gráfico 4.- Publicaciones anuales por tipología de baterías.....	58
Gráfico 5.- Publicaciones anuales por tipología de baterías de ion de litio .....	59



# 1.- INTRODUCCIÓN

## 1.1.- OBJETO

El objetivo principal de este proyecto es realizar un estudio de las ventajas e inconvenientes de los diferentes sistemas de almacenaje de energía eléctrica haciendo un especial énfasis sobre las baterías de Li-ion para coches eléctricos

## 1.2.- ALCANCE

En este estudio se pretende realizar una comparativa entre los sistemas actuales de almacenaje de energía, analizando sus posibles utilidades e intentando plasmar que inconvenientes y ventajas tiene cada sistema.

Inicialmente se realizará una recopilación de los sistemas actuales de almacenamiento de energía.

Se intentará explicar los principios básicos de funcionamiento de cada una de las tecnologías utilizadas en almacenamiento de energía eléctrica, en la actualidad.

Intentaremos reflejar que potencias pueden asumir cada tecnología, que coste tiene, y cuáles son los principales focos de aplicación para cada sistema.

Se ha intentado plasmar las tecnologías que en la actualidad se están utilizando, para los cálculos de rendimiento y los costes económicos se ha partido de las últimas instalaciones en servicio o los proyectos en ejecución con un final muy próximo, también se han contemplado prototipos ya probados y en funcionamiento.

Para los costes también se incluyen los costes de elementos o instalaciones periféricas que en las instalaciones actuales se están dando el caso, por ejemplo, una desoladora para una central de bombeo.

Para los cálculos de potencia se calcula con los sistemas en servicio, aunque también se puede dar información de aquellos que están en una fase de implantación o estudio avanzado.

Veremos la evolución de las investigaciones y su tendencia en el transcurso de los años, referenciadas a cada sistema de almacenamiento de energía.

Se realizará un estudio más en profundidad de la batería que actualmente más se está usando la de Li-ion, viendo y analizando las diferencias entre los diferentes modelos de estas, como varía su comportamiento dependiendo del tipo de batería.

Desde este punto se intentará analizar cuál son las tendencias del futuro que prototipos se están probando posibles mejoras o sustitutos de las baterías actuales.

## 1.3.- ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.

Para el presente estudio se debe tener en cuenta las siguientes premisas:

- **Tecnologías actuales**

Para este estudio cuando nos referimos a tecnologías actuales, hacemos referencia a las que ya están comercializándose.

Se analiza los sistemas de almacenamiento de energía con potencia desde 0.5 Mw hasta 8000 MW, con una densidad de energía de 0.2KWH/Kg hasta 300 KWH/Kg, por ejemplo, centrales hidráulicas de bombeo, almacenamiento de aire comprimido, almacenamiento térmico, superconductores magnéticos, supercondensadores, volantes de inercia, pilas de combustibles y diferentes tipos de baterías

Se extraen los datos de webs de empresas generadoras, transportistas y distribuidoras eléctricas, así como trabajos universitarios y artículos extraídos de Web Of Science.

- **Estudio de tendencia.**

Para el estudio de la tendencia se realiza un recuento de las publicaciones anuales extraídas de Web Of Science siguiendo el siguiente criterio de búsqueda:

- Centrales hidráulicas reversibles. Se realiza una búsqueda por TEMA, seleccionando todas las bases de datos y con las palabras: Reversible hydraulic power plant y marcando el marco de fechas desde el 1980.
- Almacenamiento aire comprimido: introduciendo las siglas CAES en el campo TEMA y seleccionando todas las bases de datos y marcando el marco de fechas desde el 1980.
- Almacenamiento térmico: Buscando las palabras Latent Heat Energy Storage Systems, en el campo TEMA, marcando todas las bases de datos y enmarcando el periodo del 1980 hasta 2020.
- Superconductores magnéticos: Se realiza la búsqueda por superconducting magnetic energy en el campo de TEMA, seleccionando todas las bases de datos y el marco temporal del 1980 al 2020.
- Supercondensadores: buscamos la palabra Supercapacitor por TEMA en todas las bases de datos y en el periodo temporal de del 1980 al 2020
- Volantes de inercia se realiza la búsqueda con las palabras flywheels energy storage con la selección de todas las bases de datos y en el marco temporal del 1980 al 2020.
- Pilas de combustible de hidrógeno: se realiza la búsqueda de “hydrogen fuel cell” en tema y seleccionando todas las bases de datos y con un marco temporal del 1980 al 2020

Pilas y baterías: se realiza la búsqueda por Battery en campo tema seleccionando todas las bases de datos y en un marco temporal del 1980 al 2020 y refinamos la búsqueda por tema energy storage.

#### 1.4.- JUSTIFICACIÓN.

La sociedad de hoy en día está inmersa en el consumo de energía, con unas tendencias de consumo al alza, a pesar de que cada vez los equipos consumen menos, cada vez son más los equipos que consumen energía.

A demás partimos de una generación de energía que proviene de combustibles fósiles y nos encontramos en una tendencia actual de la descarbonización de la energía, implantando cada vez más energías renovables, estos sistemas de almacenamiento de energía, toman un papel importante en la implantación de las renovables, ayudando a que puedan entrar en el mercado de la energía, haciéndolas más flexibles y competitivas, pudiendo garantizar un suministro estable de energía y almacenando los excesos de energía.

Si nos dirigimos a la web de RED ELECTRICA DE ESPAÑA y no centramos en ver la curva de la demanda de y la producción del 23/1/2020, a las 11:40 AM por poder coger un dato real previo al estado de alarma causado por el COVID –19 podemos extraer la siguiente tabla.

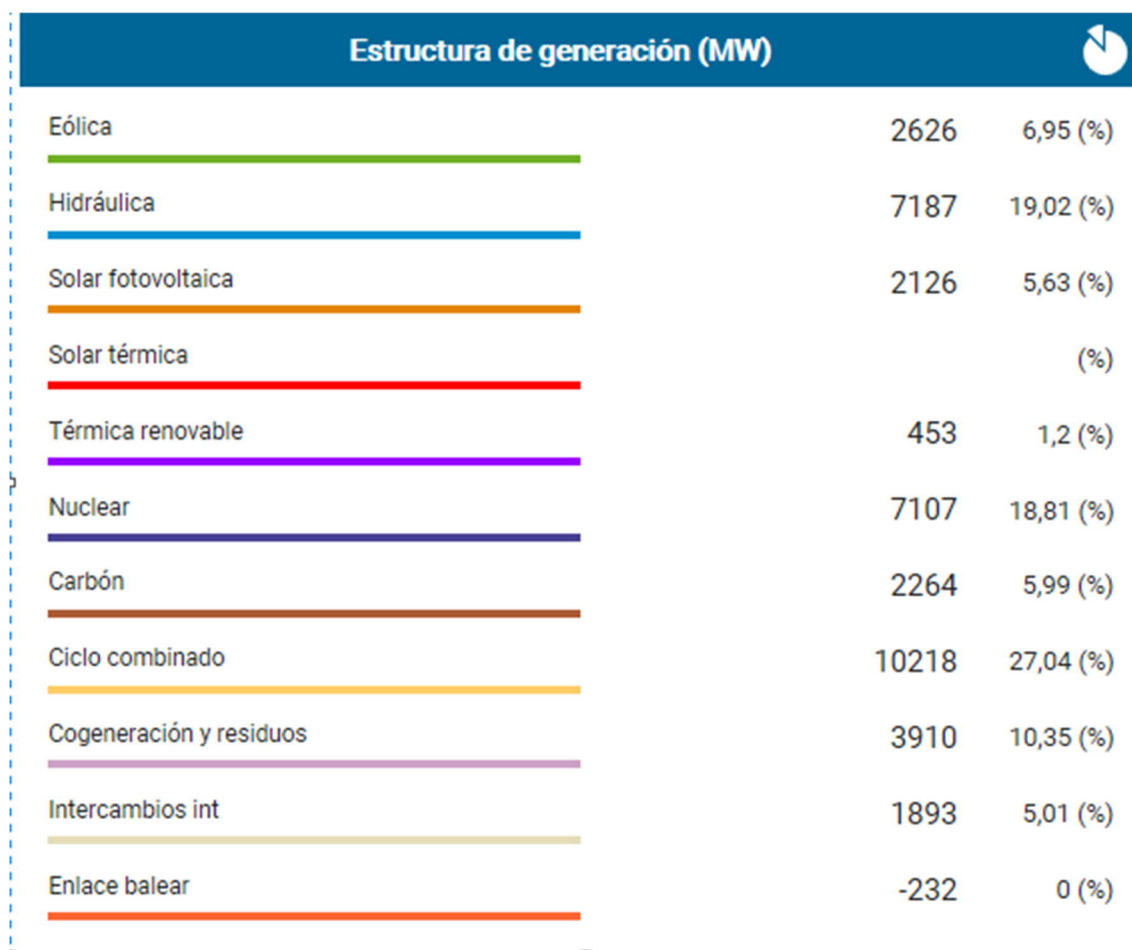


Figura 1.- Generación energética peninsular el 23/01/2020 a las 11:40 . Ree.es.

Podemos extraer de la figura 1 que el 43,38 % de la producción de energía, proviene del carbón con unas emisiones de CO<sub>2</sub> eq. Asociado de 7.109 t CO<sub>2</sub> eq / h. para una generación de 37.545 MW. Si realizamos el mismo ejercicio para el 21/01/2016 podemos observar que las emisiones de CO<sub>2</sub> eq son de 8300 t CO<sub>2</sub> eq/h., para 36.030 MW. Lo que denota un cambio en el método de generación de energía hacia una tendencia a la descarbonización. El desarrollo de la energía renovables como la eólica y la fotovoltaica ya es una evidencia, pero se enfrenta a la dificultad de los suministros intermitentes, lo que requiere de fuentes de energía de respaldo y suficiente almacenamiento de electricidad durante horas, días o incluso semanas [10]

No tenemos que negar que la sociedad está en plena era de movilidad eléctrica, hoy en día, cada vez es más la afluencia de vehículos de movilidad alimentados con energía eléctrica.

Cada vez contamos con una flota superior de vehículos eléctricos como los coches, bicicletas y patinetes. Es una época en la que las empresas de alquileres de estos vehículos están en plena expansión. Cada día hay más App's de alquiler de este tipo de vehículos.

Es esta una de las razones por la que se va a hacer hincapié en las tecnologías de almacenamiento que pueden abastecer o suplir esta necesidad de movilidad, en la actualidad estos vehículos se están alimentando mediante baterías de Ion-litio. En el siguiente gráfico podemos observar la tendencia del parque los vehículos eléctricos matriculados en España

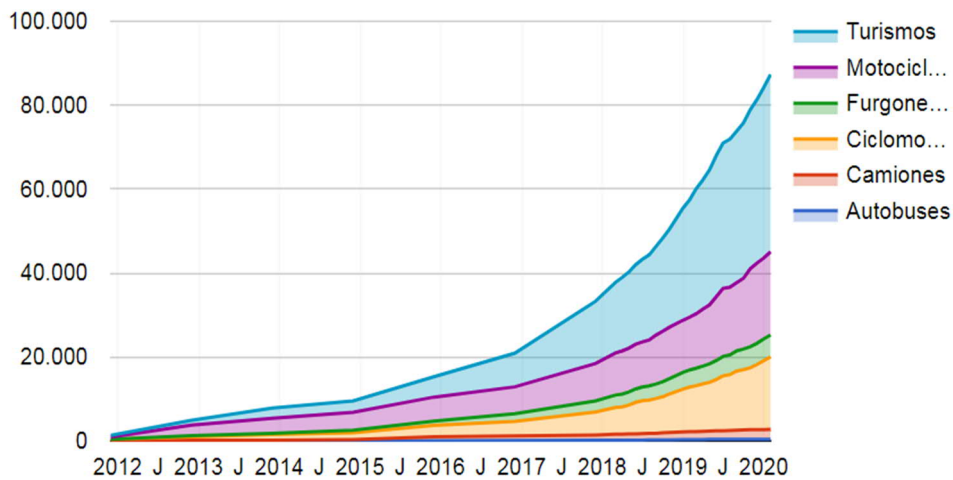


Gráfico 1.-Evolución del parque de vehículos eléctricos en España. [www.evobservatory.iit.comillas.edu](http://www.evobservatory.iit.comillas.edu)

Observado la gráfica 1 vemos la tendencia creciente del parque de vehículos eléctricos. Este incremento en los vehículos eléctricos hace que haya una previsión de que el 42% de las ventas en el 2020 de baterías de litio vayan destinadas a este sector unos 15mil millones \$ y con un incremento del 10% anual [28]

Este gran volumen de baterías y su incremento esperado, añadiéndole que estos vehículos solo utilizan el 20% de su capacidad abre un nuevo abanico de posibilidades con estas baterías con una capacidad del 80% de la original que se podrían utilizar para favorecer la integración de las renovables abaratando costes, ahorrando residuos y favoreciendo la economía circular

Se pretende ver como se encuadra la evolución de esta tecnología, como se está usando y cuáles son las nuevas líneas de investigación para poder abastecer a este tipo de equipos de movilidad.

Partimos de la premisa que para ser completamente sustitutos de los combustibles fósiles que en la actualidad se utiliza en los vehículos móviles, se debe llegar a una autonomía similar a la actual del diésel o gasoil, se debe tener en cuenta los tiempos de recarga Y los costes totales de una y otra tecnología.

## 2.- INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS ACTUALES.

En la actualidad los sistemas de almacenamiento de energía se centran en el principio básico de la energía, la energía ni se crea ni se destruye, se transforma.

Usan la energía eléctrica para transformarla en energía potencial, química, cinética Podemos agrupar los métodos de almacenamiento en dos tipos los de gran escala, que serían los que utilizan los generadores transportistas y distribuidores y los de pequeña escala que serían los que utiliza el consumidor final, hay que tener en cuenta que los de pequeña escala serán mayor en número que los de gran escala.

Los de gran escala están diseñados para almacenar MW o GW mientras que los de usuarios finales cuentan con sistemas que trabajan en rangos de KW o W.

En los sistemas de gran escala el método más utilizado por su mayor fiabilidad y rendimiento es el bombeo hidráulico. Consiste en bombear agua a una cota superior para después turbinarla, estos sistemas se podrían considerar que no emiten emisiones a la atmósfera y son muy útiles para la estabilidad del sistema eléctrico y para una mayor utilización de las energías renovables, aprovechando los momentos de mayor generación y almacenando la energía para cuando hay escasez de sol o viento, por ejemplo.[6],[7],[8], [www.ree.es](http://www.ree.es)

Almacenamiento de aire comprimido, Compressed Air Energy Storage (CAES), es un método que se puede equiparar al de las centrales hidroeléctricas de bombeo, en este caso consiste en almacenar aire de la atmósfera comprimiéndolo en depósitos dentro de la tierra y a posterior se pasa el aire por una turbina para conseguir energía. A nivel de producción las más eficientes son las de gran escala, pero este sistema de almacenaje también se puede utilizar a nivel consumidores domésticos y elementos móviles, de hecho, hay prototipos de coches que funcionan mediante aire comprimido. Los rendimientos de esta tecnología están por de bajos de las hidráulicas de bombeo, tiene muchas pérdidas por los efectos de disipación térmica en el proceso de compresión y descompresión del aire. Tiene rendimientos inferiores al 70% [1] en muchos casos rondando el 50% mientras que las centrales de bombeo están entre el 70 y el 85%.[6], [9]

Otro sistema a gran escala es el almacenamiento térmico, consiste en almacenar la energía en materiales que permitan retenerla para su posterior liberación de forma controlada. Estos materiales mantienen constante la temperatura durante el cambio de fase mientras que el material almacena o cede energía. Este hecho supone una mayor densidad energética en comparación con cualquier otro. Su uso está ligado al de las energías renovables para ajustar los periodos de suministro a los de demanda.[2]

El siguiente sistema es el de los supercondensadores, estos funcionan almacenando la energía eléctrica en forma de cargas electrostáticas confinadas en pequeños dispositivos, formados por pares de placas conductoras separadas por un medio dieléctrico. La construcción y funcionamiento es similar a un condensador convencional [3]. Los supercondensadores tienen mucha capacidad eléctrica (Faradios), con lo que consiguen almacenar mucha más energía que los convencionales, se comercializan modelos con capacidades del orden de 1KWh y pueden trabajar con potencias de KW a MW. Tienen alta disponibilidad de potencia, del orden de MW/s, una eficiencia elevada superior al 95%, y una vida lo suficiente larga para lograr costes competitivos [4].

Volantes de inercia este sistema consiste en un disco, normalmente metálico que se hace girar mediante la aplicación de un par motor, para después intentar frenar el volante aplicando un par resistente, conservando la energía eléctrica en forma de cinética

Pila de hidrógeno o pila de combustible es un sistema electroquímico que tiene un funcionamiento similar al de una batería. Convierte la energía química de un combustible en electricidad, en el caso de que el combustible sea el hidrógeno, este reacciona con el oxígeno, en este caso están separados por un electrodo para que poder extraer la energía eléctrica de esta reacción [5]

Pilas y baterías son acumuladores eléctricos que convierten la energía química almacenada en energía eléctrica, están compuestas por un ánodo, electrodo positivo, un cátodo, electrodo negativo y un electrolito, de esta manera genera un movimiento de iones entre los electrodos permitiendo que los electrones se muevan por fuera de la batería. Hay diferentes tipos de baterías, de Plomo-Acido de Ni-Cd, de Litio, de Sodio, manganesio, las pilas y baterías son el elemento seleccionado por excelencia en la mayoría de los elementos móviles o portátiles.

A continuación, se profundizará en cada uno de los sistemas de almacenamiento de energía, intentaremos comprender como funcionan, cuáles son sus rendimientos, donde se están aplicando en la actualidad y sus posibles aplicaciones, su evolución en el tiempo hasta el día de hoy.

## 2.1.- CENTRALES HIDROÉLECTRICAS REVERSIBLE

Las Centrales hidroeléctricas de bombeo o reversibles, son un excelente método de almacenaje de energía, es un buen método para ayudar a la integración de energías renovables, pudiendo aprovechar los excedentes de energía para bombear agua de una cota inferior a una superior, dejando almacenada la energía en forma de energía potencial, esta energía puede ser liberada en cualquier momento que se precise abriendo compuertas y turbinando el agua, esto se puede hacer cuando hay carencia de energías debido a la falta de sol o viento o bien cuando el precio de mercado es superior.

La primera central de bombeo se instaló en Suiza en 1882. En 1930 ya se usaban rodets reversibles [6]

La central de bombeo más grande instalada, Central de Bath County. 3.003 MW. Estados Unidos [7], la que dispone del salto más grande está situada en Italia, Piastra Edolo, con una altura de 1260m y una potencia de 1020 MW.

Se trata de una tecnología suficiente mente conocida y explotada, en la actualidad se han mejorado las turbinas y se consiguen mejores rendimientos que conllevan a poder aumentar la producción de energía. Lógicamente es una instalación cara hay que tener en cuenta que requiere de grandes volúmenes de espacios para poderlas ubicar y necesita una diferencia de altura para poder turbinar el agua y sacar un rendimiento interesante, con las tecnologías que se están explotando en la actualidad. Este tipo de almacenamiento de energía no emite emisiones a la atmosfera, pero sí que supone un impacto en el medio ambiente debido a las zonas que se inundan, así que este impacto deberá evaluarse en cada caso en concreto con un estudio ambiental.

Es un sistema estático, con esto quiero decir que no se puede transportar, el almacenaje está ubicado siempre en el mismo sitio y se transporta la energía,

El rendimiento de estas centrales o almacenamiento de energía es de alrededor del 80% con las tecnologías actuales, las más antiguas rondan un rendimiento del 60% [8]

El coste de una central hidroeléctrica reversible es de teniendo en cuenta los últimos valores de la que se está construyendo en Soria-Chira que consta de 200MW con una inversión de 320 millones de €, lo que nos viene dando un coste de 1,6 €/x W

En la figura 1 se muestra una de la última central hidroeléctrica reversibles instalada en España



## Principales elementos de la central hidroeléctrica reversible Soria-Chira

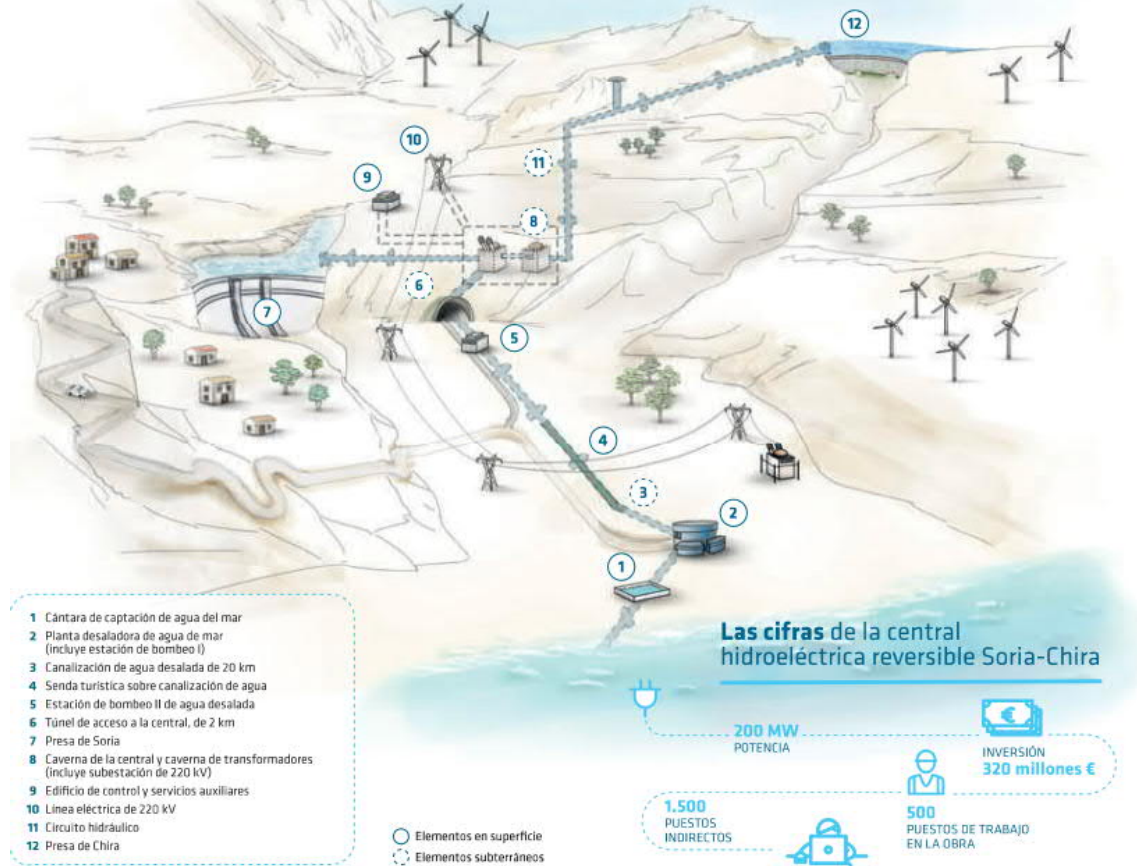


Figura 2.- Central hidroeléctrica reversible. Fuente: ree.es

En la tabla 1 se muestran algunos ejemplos de centrales españolas, con su año de puesta en servicio y potencia instalada

	Año	P. Instalada en MW
La Muela	1989	630
La Muela II	2013	850
Sallente	1985	415
Villarino	1970	810
Gobantes	1947	382
Urdiceto	1930	7,2
Guillena	1973	210
Tajo Enc.	1973	400
Bolarque II	1910	15
Aguayo	1982	360
Moralets	1983	200

Tabla 1.- Algunos ejemplos de centrales españolas

En la tabla 2..Matriz DAFO para centrales hidroeléctricas de bombeo

DEBILIDADES	AMENAZAS
Rendimientos inferiores a otras tecnologías de almacenamiento Requiere grandes superficies Es una tecnología estacionaria	Requiere inunda miento de superficies Utiliza el agua que puede ser un recurso natural
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
Puede almacenar grandes cantidades de energía Agilidad en la variación de carga Tecnología con experiencia	Centrales a pequeña escala para integrar renovables

Tabla 2- Matriz DAFO centrales de bombeo

Las conclusiones extraídas del DAFO nos indican que es un sistema apto para necesidades de almacenamiento para grandes capacidades o para instalaciones alejadas de núcleos urbanos en los que los costes de los terrenos no sean elevados, en los que prevalezca la cantidad antes que el rendimiento se resalta la gran oportunidad en centrales a pequeña escala para integrar renovables sin necesidad de inundar grandes superficies. Una tecnología madura que tiene bien definido su ámbito de aplicación

## 2.2.- ALMACENAMIENTO DE AIRE COMPRIMIDO

El sistema de almacenamiento de energía eléctrica mediante aire comprimido (CAES) de sus siglas en inglés, es un sistema que tiene un funcionamiento similar al de las centrales hidroeléctricas de bombeo, se utiliza energía para comprimir aire en un depósito, de esta manera la energía se queda almacenada dentro del depósito debido a la presión del aire, para su posterior utilización cuando se requiera, liberando el aire y haciéndola pasar por una turbina. La idea básica de estas centrales de almacenamiento de energía es aprovechar las horas valle y nivelación de cargas [29], momento en el que se consume menos energía para comprimir el aire y almacenarla y en los momentos de consumo pico, aquellos que hay más consumo y la electricidad es más cara, liberar el aire comprimido haciéndola pasar por una turbina, para generar energía e inyectarla a la red. Inicialmente esto se pensaba para utilizar la energía procedente de las centrales térmicas y las nucleares, pero hoy en día con la descarbonización de la energía se estudia y se plantea para complementar las energías renovables y darles más flexibilidad. Este sistema tiene unas pérdidas importantes con la disipación de calor, es por esto que para plantas de gran escala es necesario la utilización del calor disipado en la compresión del aire para mejorar el rendimiento de la planta



A diferencia de las centrales hidráulicas esta tecnología puede ser móvil. Se puede instalar un depósito de aire comprimido en equipos portátiles o vehículos, de hecho, este sistema se ha utilizado en la propulsión de locomotoras en minería

Este sistema no está tan extendido como el de las centrales hidroeléctricas. Su primera aplicación fue en el 1978 en Alemania

Este sistema de almacenamiento suele utilizar las cavernas de sal subterráneas los acuíferos naturales y los depósitos de gas natural agotados, de esta manera aumenta su rentabilidad para capacidades grandes, cerca de 2000MW en instalaciones subterráneas con tiempos de descarga de entre 8 y 26h y entre 3 y 15 MW en superficie con tiempos de descarga de entre 2 y 4h. [30]

Este sistema tiene varias variantes. Una de las más utilizadas es la que se representa en la figura 2, este tipo de central comprime el aire con los excedentes de energía, posteriormente utiliza el aire comprimido mezclado con gas natural para ser turbinado en una turbina de gas. Este diseño requiere de un aporte de energía extra, la que aporta el gas natural, lo que conlleva el consumo de un combustible fósil con su respectiva emisión a la atmósfera. Las denominan híbridas.

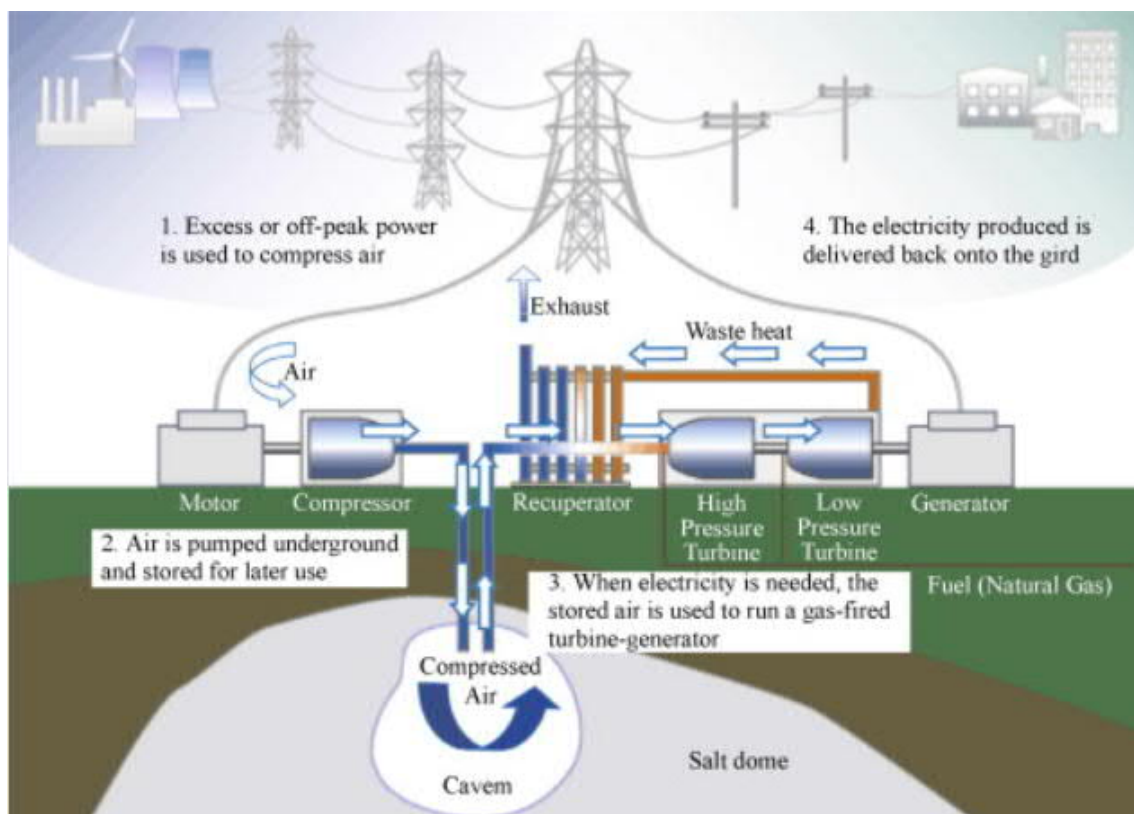


Figura 3 - Esquema de almacenamiento de energía con aire comprimido. Fuente: Pontificia Universidad Católica de Chile

En el 2012 entró en servicio una central "The Gaines, Texas Dispatchable Wind Project." en Texas que no utiliza combustibles fósiles, se trata de un sistema para poder acumular la energía de un parque eólico de 2MW.

Existen prototipos de almacenamiento de energía combinando esta técnica con otras, debido a uno de los problemas de este sistema, cuando el depósito está lleno tiene una potencia elevada, pero a medida que el depósito se va vaciando la potencia disminuye.

Para lograr una potencia más estable se puede combinar con volantes de inercia, o con la energía potencial gravitatoria del agua. Como se muestra en la figura 3

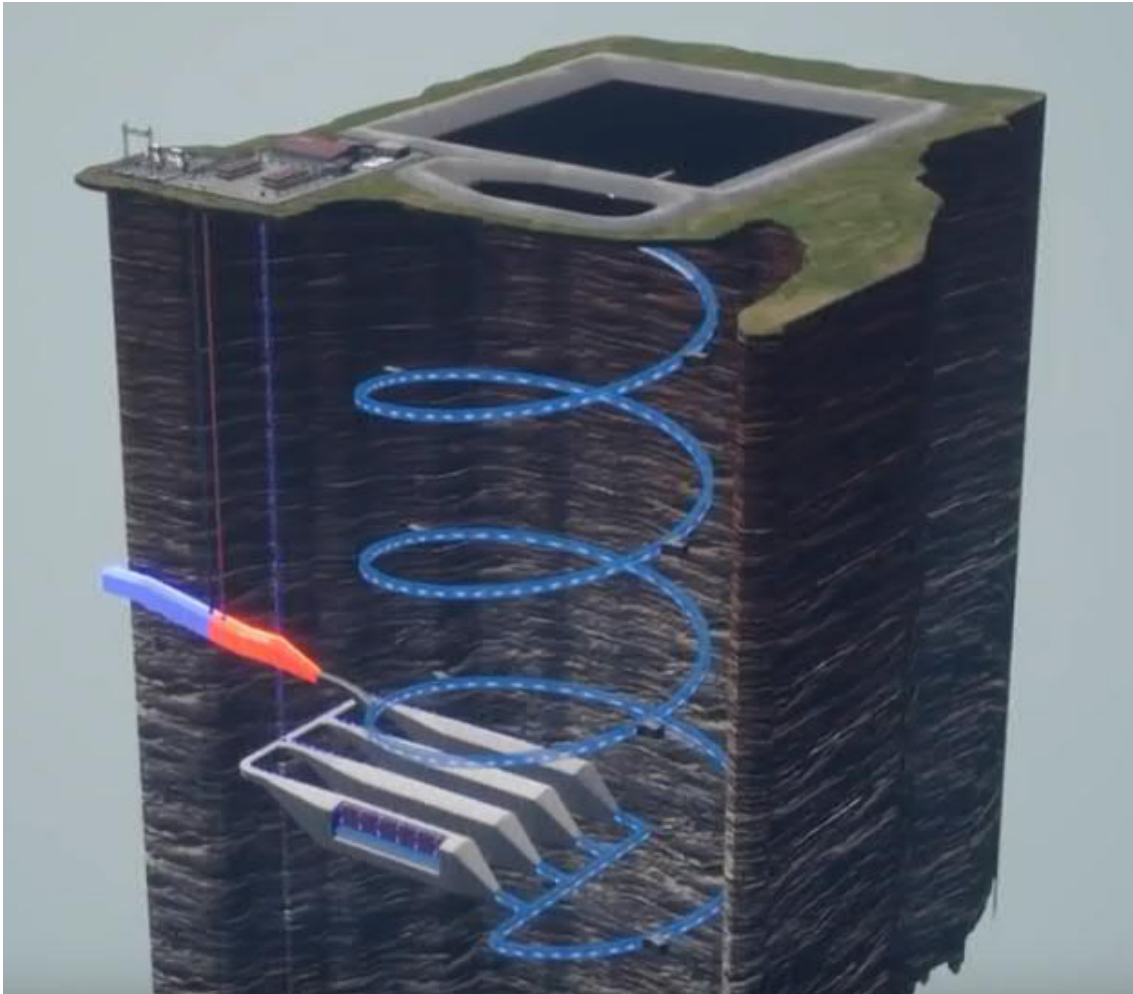


Figura 4 - Central CAES con energía potencial del agua. Fuente: Revista RD Energía

Estas centrales CAES adiabáticas, cuentan con un refrigerador de aire en la salida del compresor, almacena el calor extraído del aire en un acumulador de calor, para su posterior uso y una cámara de combustión para calentar el aire previo al paso por la turbina. Al recuperar el calor generado en la compresión incrementamos notablemente el rendimiento de este sistema, pasa de 38% de una central simple a un 62% en una central adiabática, el problema de este diseño es que en la actualidad todavía no hay ninguna central en funcionamiento y muchas de sus equipos se encuentran en fase de testeo, como el acumulador de energía térmica y el compresor de alta presiones que deben ser sin inter-refrigeraciones [9]

A pesar de sus rendimientos y del punto de investigación en el que se encuentra esta tecnología ya hay prototipos para vehículos propulsados

Este sistema de almacenamiento de energía se ha probado en vehículos, hoy en día TATA está probando con Mini Cat un coche pequeño que puede tener una autonomía de 200km. Desde finales del siglo XVIII se utilizan locomotoras propulsadas por aire comprimido para trabajos en ambientes que donde el humo podría ser un problema, como puede ser la minería.

DEBILIDADES	AMENAZAS
Perdidas por disipación de calor Variación de la potencia en función de la presión	Riesgo de equipos a presión Rendimientos inferiores a otros sistemas
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
Gran capacidad de almacenaje Bajo coste baja tasa de auto descarga	Posibilidad de movilidad mediante deposito Aplicación en industrias

Tabla 3- Matriz DAFO centrales de almacenamiento de aire comprimido.

De la tabla DAFO sacamos la conclusión que es un sistema con una posibilidad de uso importante en función de su ubicación geográfica, tiene grandes posibilidades en complejos industriales y se podría utilizar como sistemas de alimentación de emergencia, tal y como se utilizan ahora los grupos electrógenos de respaldo.

### 2.3.- ALMACENAMIENTO TERMICO

El almacenamiento térmico es una técnica de almacenamiento que se basa en aplicar temperatura a un elemento para a posterior utilizar esta temperatura y poder generar energía eléctrica.

En la actualidad existe un proyecto piloto de SIEMENS GAMESA que almacena energía térmica en piedras volcánicas, la energía se extrae de la electricidad, haciendo pasar aire por una resistencia eléctrica e inyectando el aire caliente en las piedras volcánicas, llegando estas a una temperatura de 750°C y cuando es requerida la energía, utiliza una turbina de gas para volver a generar energía eléctrica. Este proyecto tiene una capacidad de almacenaje de 130MWh con la intención de poder realizar nuevos proyectos para almacenar del orden de GWh, Fuente [enrgetica21.com](http://enrgetica21.com). (Almacenamiento - La primera instalación de almacenamiento térmico de energía eléctrica con piedras volcánicas entra en funcionamiento n.d.)

Este sistema de almacenamiento es adecuado para aprovechar excedente de energía procedente de las fuentes de energía renovables o para almacenar energía en épocas valle y generar en época picos, pero de cara al estudio de la movilidad tiene ciertas limitaciones.

Se requieren muchas infraestructuras y un tamaño importante para el almacenamiento de calor, con lo que conlleva un aislante térmico importante. El coste principal y donde se está indagando es en la innovación de nuevos materiales para almacenar el calor. De cara a nuestro estudio, es una tecnología que no indagaremos más en profundidad, debido a no poder utilizarla en elementos móviles, no hay instalaciones en servicios como tal, las aplicaciones que están en funcionamiento con rendimientos interesantes son las captaciones de energía solar.

DEBILIDADES	AMENAZAS
Bajo rendimiento Requiere infraestructura para aislar	Trabaja a altas temperaturas
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
Escalable dentro de sus márgenes	Tecnología en fase inicial Posibles aplicaciones en industrias que requieran disipar calor

Tabla 4- Matriz DAFO centrales de almacenamiento térmico.

Por el momento y con la tecnología actual no parece una buena opción en condiciones normales. Para escoger la aplicación de este método tendría que ser condicionado por condiciones externas, como por ejemplo que ya dispongamos de una instalación para energía solar térmica y la aprovechemos.

## 2.4.- SUPERCONDUCTORES MAGNETICOS

Este sistema de almacenamiento conocido por las siglas (SMES) está basado en el almacenamiento de energía eléctrica mediante un campo magnético, circulando una corriente por una bobina hasta que esta queda cargada magnéticamente. Una vez esta bobina se encuentra cargada magnéticamente la corriente circula constante por la bobina, conteniendo la energía en forma de campo magnético.

Estos equipos están formados por una bobina de material superconductor, esta bobina se encuentra en estado de crionización, mediante la refrigeración forzada, normalmente mediante helio líquido, con lo que se consigue que no haya resistencia a la conducción de energía, al no presentar resistencia se evitan las pérdidas y la disipación de energía en forma térmica. De este modo la energía puede estar almacenada hasta que se requiera. Para poder utilizar el helio como refrigeración se precisa de un depósito para almacenar el refrigerante, una bomba que lo impulsa y un sistema de inversión de potencia. [15](Ana Barbón Núñez UNIVERSIDAD DE OVIEDO Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Página 2 de 118 Índice n.d.)

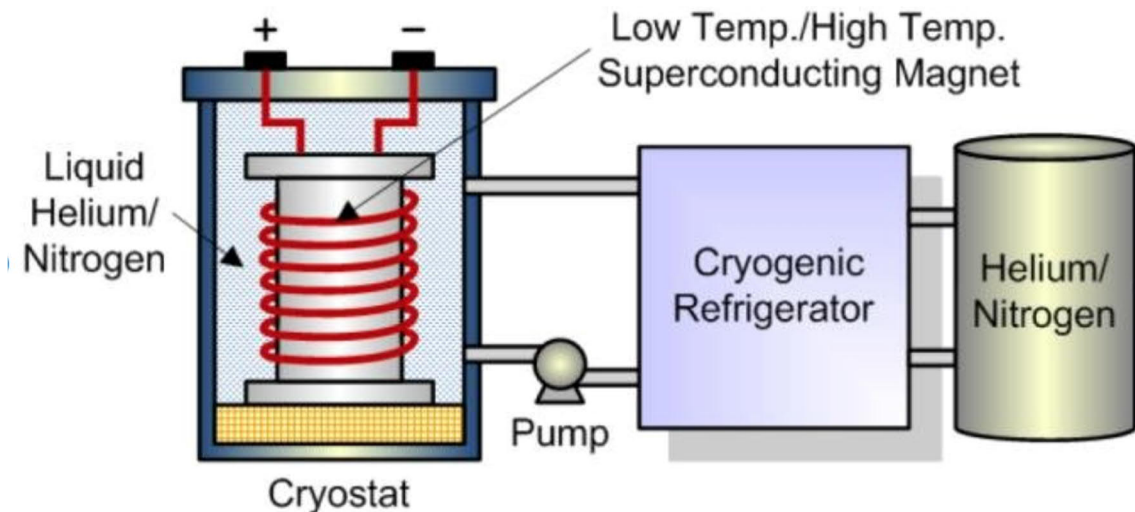


Figura 5 .- Diseño de sistema de almacenamiento de energía (SMES) <https://www.researchgate.net/>

Debido a su sistema de almacenamiento de energía en forma de corriente circulatoria, estos equipos tienen la capacidad de entregar la energía de forma casi instantánea. Gracias a su baja resistencia cuentan con una alta eficiencia en el almacenamiento de energía. Proporciona un rango de almacenaje en tamaños más reducidos que otros sistemas y con un mantenimiento muy reducido. El punto débil de este sistema es la necesidad de refrigeración, este le provoca un consumo de energía, lo que reduce su eficiencia e incrementa considerablemente su coste. Para solucionar este problema se están estudiando superconductores de altas temperaturas y así poder eliminar este punto débil. [15](Ana Barbón Núñez UNIVERSIDAD DE OVIEDO Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Página 2 de 118 Índice n.d.)

Estos sistemas tienen una energía específica entre 0,27 y 75 Wh/Kg, una densidad de energía de 0,2 hasta 13,8 KWh/m<sup>3</sup>, una potencia específica de 500 a 15.000 W/Kg, una densidad de potencia de 300 a 4.000KW/m<sup>3</sup>, la eficiencia ronda entre los 80 y 99 %, una esperanza de vida entre 10.000 a 100.000 ciclos, cuenta con una tasa de autodescarga de entre un 1 y un 15% diaria, su escala de 0,01 a 200 MW su coste de energía es de 500 a 1.080.000 US\$/KWh y su coste de potencia es entre 196 a 10.000 US\$/KWh.

DEBILIDADES	AMENAZAS
Necesidad de refrigeración externa	Dificultades para aplicaciones móviles
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
Alta velocidad de respuesta Alta esperanza de vida	Posibilidad de aplicación con superconductores de alta temperatura Aplicaciones para mejorar la calidad de energía en la red

Tabla 5- Matriz DAFO superconductores magnéticos



Debido a la necesidad de un sistema de refrigeración externo, se reducen las aplicaciones de este sistema de almacenamiento de energía, se ve una alta posibilidad de aplicación en aplicaciones de calidad de red y en aplicaciones estáticas. Cuando se consiga diseñar este sistema con superconductores de alta temperatura se ampliará mucho el uso y aplicaciones de este sistema de almacenamiento.

## 2.5.- SUPERCONDENSADORES

Los supercondensadores son elementos de almacenamiento de carga eléctrica basado en la acumulación de electrones por cargas cinéticas, estos almacenan esta carga mediante una solución electrolítica entre dos conductores sólidos, los electrodos son a menudo hechos de carbono poroso. Estos equipos tienen una capacidad de almacenamiento de energía muy superior a los condensadores comunes. [10](Chen et al., n.d.)

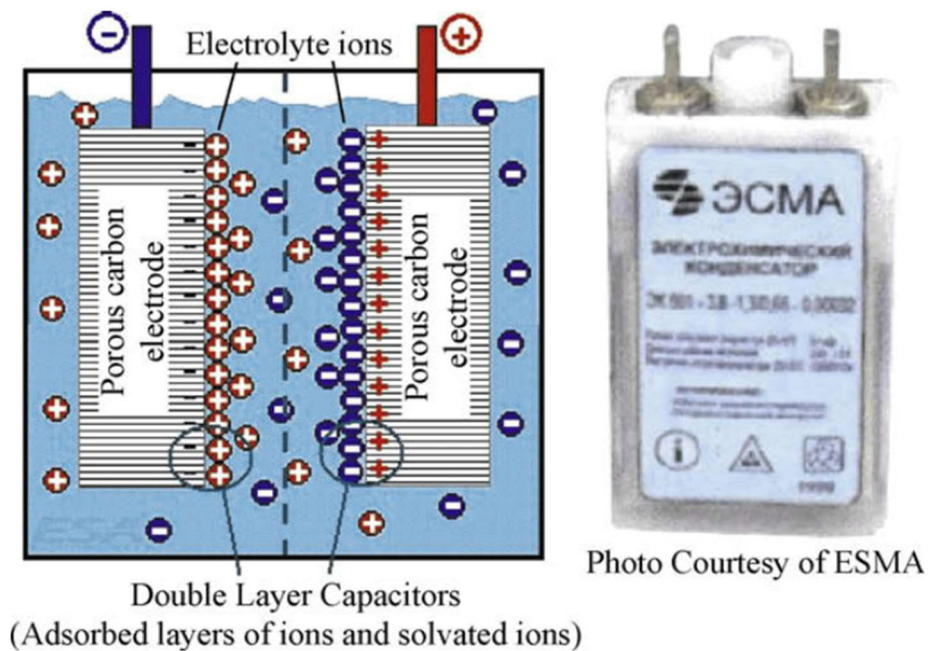


Figura 6.- Supercondensadores. Fuente: (Chen et al. 2009a)

Estos equipos al no depender de una reacción como es el caso de las baterías soportan un número muy superior de ciclos de carga. Tienen una eficiencia energética de un 98% y una densidad energética baja pero una densidad de potencia alta, lo que se traduce en que proporcionas descargas rápidas.[11](Carrera n.d.)

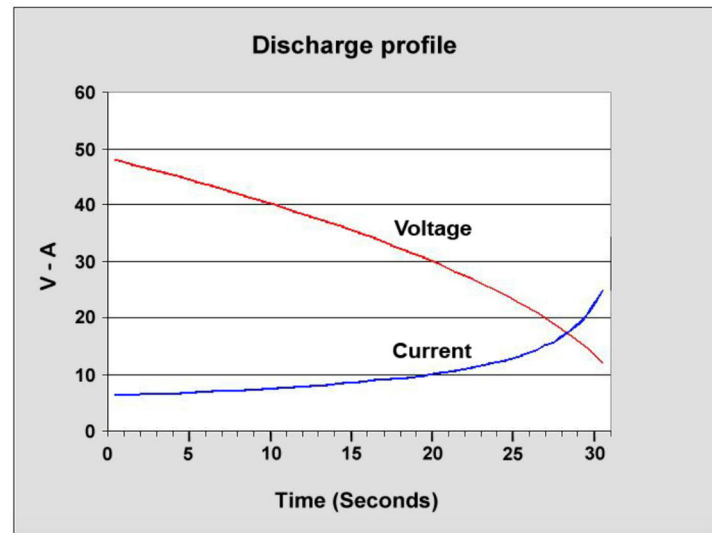


Figura 7.- grafico de descarga de un Supercondensadores. Fuente: (Los Supercondensadores Y Su Viabilidad Como Sistema De, Clara Pérez Lobo Tutor, and Isidoro Lillo Bravo n.d.)

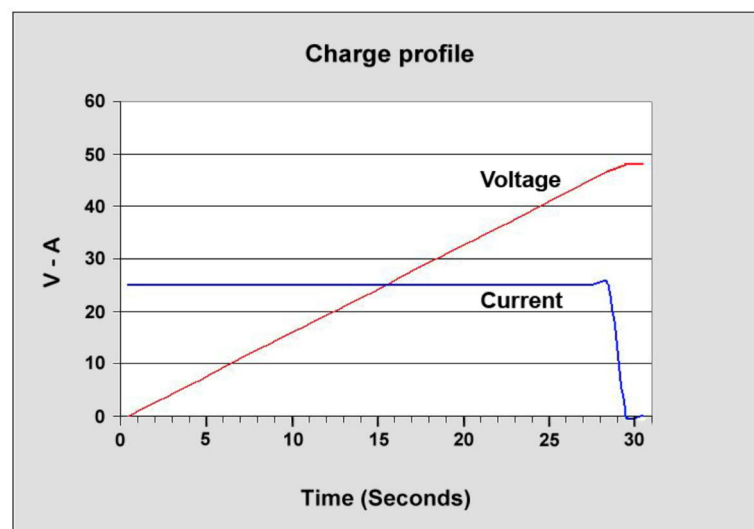


Figura 8.- grafico de carga de un Supercondensadores. Fuente: (Los Supercondensadores Y Su Viabilidad Como Sistema De, Clara Pérez Lobo Tutor, and Isidoro Lillo Bravo n.d.)

Entre las ventajas a destacar de estos sistemas de almacenamiento de energía son la alta capacidad de suministrar potencia, debido a que acumulan las cargas por medios físicos y no químicos, con potencias alrededor de los 5kW. Tienen periodos de cargas muy rápidos del orden de minutos y segundos, soportan millones de ciclos de carga, lo que se traduce en una larga vida. Soportan valores de corriente muy elevados, cuentan con unos rendimientos considerables y no requieren mantenimiento, lo que no los hace idóneos para montarlos en sitios poco accesibles. Tienen un peso reducido, si los comparamos por ejemplo con las baterías, cuentan con un nivel de seguridad alto, no explotan y trabajan en un nivel de temperatura muy amplio.

Por lo contrario, entre las desventajas se encuentran la baja densidad energética, almacenan entre una quinta y una décima parte de una batería, para poder extraer su energía necesita de reguladores para adecuar las tensiones, las células tienen bajas

tensiones, su auto descarga se considera alta debido a que pueden perder la mitad de su carga en un mes y los precios son elevados.[12](Los Supercondensadores Y Su Viabilidad Como Sistema De, Clara Pérez Lobo Tutor, and Isidoro Lillo Bravo n.d.)

Respecto al precio ya hay empresas que están anunciando nuevos dispositivos con un precio mucho más competitivos, es el caso de SUNVAULT que está dando noticias que sus dispositivos tendrán un precio alrededor de 100\$ por KWh y las compara con las baterías de TESALA con precio de 150\$ por KWh. [13] (Sunvault Unveils 1000F Graphene Supercapacitor n.d.).

Estos equipos tienen una utilidad que algunas empresas ya comercializan y es en conjunto con las baterías, utilizan los supercondensadores para suministrar y asumir los picos de energía. El resto lo gestionan mediante baterías, de esta manera alarga la vida de las baterías al reducir el envejecimiento por calentamiento y sacan una mayor eficiencia y aprovechamiento de la energía, tanto en la carga como en la descarga.

DEBILIDADES	AMENAZAS
Baja densidad de energía. Coste alto Tasas de autodescarga alta	
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
Alta densidad de potencia Larga vida Bajo mantenimiento Alto rendimiento	Posibilidad de combinación con sistemas de alta densidad de energía

Tabla 6 - Matriz DAFO supercondensadores.

Los supercondensadores tienen unas aplicaciones actuales muy características, para suplir picos de potencia donde se requiere alta potencia en un período corto de tiempo. Del dafo anterior sacamos la conclusión de que puede ser un candidato complementario a otros sistemas como las baterías, en aplicaciones como una aceleración fuerte y espontanea en un vehículo.

## 2.6.- VOLANTES DE INERCIA

Los volantes de inercia también conocidos por sus siglas en ingles FES “flywheels energy storage” son elementos que almacena la energía en forma de momento angular de una masa. El funcionamiento es sencillo, en el proceso de carga se aplica energía a un motor que hace mover un rotor y en el proceso de descarga el motor se convierte en generador y convierte el movimiento del rotor en energía.



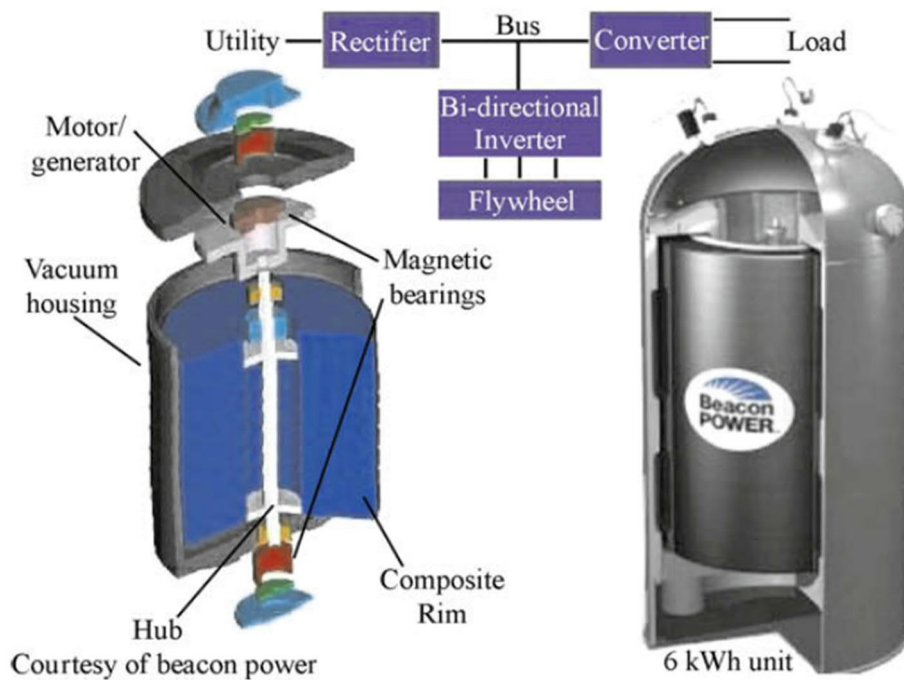


Figura 9.- Sistema de volante de inercia. Fuente: (Chen et al. 2009a)

La energía del volante de inercia depende del tamaño y la velocidad del rotor y la potencia depende del generador.

Las ventajas de estos equipos son que soportan una gran capacidad de descargas, descargas completas, se habla de una vida útil de unos 20 años, tienen unos rendimientos de entre el 90 y 95% y otorgan mucha potencia en un periodo corto de tiempo [10](Chen et al. 2009a)

Tienen una aplicación bastante extendida para poder suplir los micro cortes de energía o para facilitar la conmutación entre diferentes fuentes de energía sin que haya fluctuaciones de potencia.

Como contra tienen una baja densidad de energía, una autodescarga alta comparado con otro tipo de almacenaje, disminución lineal del voltaje durante la descarga y un precio elevado por Watio.

Hay empresas como BEACOM POWER que comercializan módulos de volantes de inercia de 1MW

DEBILIDADES	AMENAZAS
Baja densidad de energía Precio alto	Alta capacidad de autodescarga Disminución lineal del voltaje durante la descarga
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
Descargas completas Larga vida Alto rendimiento	Aplicaciones para micro cortes o picos de consumo

Tabla 7- Matriz DAFO volantes de inercia.

Posibles aplicaciones para calidad de energía, aportando pico de energía y evitando los micro cortes. Para aplicaciones móviles parece que en la actualidad hay mejores opciones.

## 2.7.- PILAS DE COMBUSTIBLES DE HIDROGENO.

Este sistema se basa en la obtención de energía mediante la combinación del hidrogeno y el oxígeno, es un proceso electroquímico que convierte la energía química de los combustibles en energía eléctrica. Para el caso de las pilas de combustible de hidrogeno se utiliza hidrogeno y oxígeno, la combustión directa de estos elementos proporcionaría una gran energía térmica, pero como ese no es objetivo se realiza mediante un electrolito. Dependiendo del tipo de electrolito que se utilice hay diferentes tipos pilas de combustible y cada tipo de pila da lugar a una reacción específica en sus electrodos, el electrodo negativo es el hidrogeno y el cátodo positivo es el oxígeno. Los principales tipos son: pilas de combustible de óxido sólido, SOFC (del inglés solid oxide fuel cell); las pilas de combustible de carbonato fundido, MCFC (del inglés molten carbonate fuel cell); las pilas de combustible alcalinas, AFC (del inglés alkaline fuel cell); las pilas de combustible de ácido fosfórico, PAFC (del inglés phosphoric acid fuel cell), y las pilas de combustible de membrana de intercambio de protones, PEMFC (del inglés, proton exchange membrane fuel cell). [14](Llorca n.d.).

Tipo de pila	SOFC	MCFC	AFC	PAFC	PEMFC
Electrolito	óxido cerámico	carbonato líquido	disolución alcalina	ácido fosfórico	membrana polimérica
Temperatura de trabajo	600-1000°C	~650°C	50-200°C	~220°C	50-100°C
Transportador de carga	O <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>
Rango de potencia	1 kW-10 MW	50 kW-10 MW	500 W-10 kW	10 kW-1 MW	1 W-100 kW

Tabla 8.-Principales tipos de pila de combustible y sus principales características.

Dado que el hidrogeno no se encuentra en estado libre en nuestro entorno es necesario crearlo, lo que implica un gasto de energía. Teniendo en cuenta los casos más productivos y con las últimas tecnologías, en la producción de hidrogeno tenemos un rendimiento del 90% y la pila de hidrogeno con mayor rendimiento que son las que utilizan oxígeno llegan a un rendimiento del 85%.

Las ventajas de este sistema de almacenamiento son:

- No contaminan, las emisiones son vapor de agua.
- Tienen una elevada eficiencia térmica, no está limitado por el ciclo de Carnot.
- Las más eficientes, las que utilizan oxígeno directamente tienen un rendimiento del 85%.

- Poco sensibles a las variaciones de temperatura.
- Alta eficiencia en cargas parciales
- Dispositivos de estado sólido y reaccionan instantáneamente a cambios en las cargas de trabajo.
- Se pueden aplicar tanto en aplicaciones móviles como estáticas.
- Se pueden utilizar en aplicaciones para el automovilismo, por sus bajas temperatura y alta velocidad de respuesta.

Como desventajas podemos nombrar las siguientes.

- La producción, transporte y almacenamiento del hidrogeno es caro.
- Las pilas de combustible son exigentes con la calidad del combustible, los catalizadores se degradan fácilmente con las presencias de Azufres o monóxidos de carbono.
- El agua que se forma puede ser un problema, hay que disiparla, almacenarla o evacuarla.
- Los electrolitos y las membranas son sensibles al grado de humedad.
- Tienen una fabricación cara.
- Los materiales utilizados como catalizadores son caros.
- Son dispositivos pesado y voluminosos

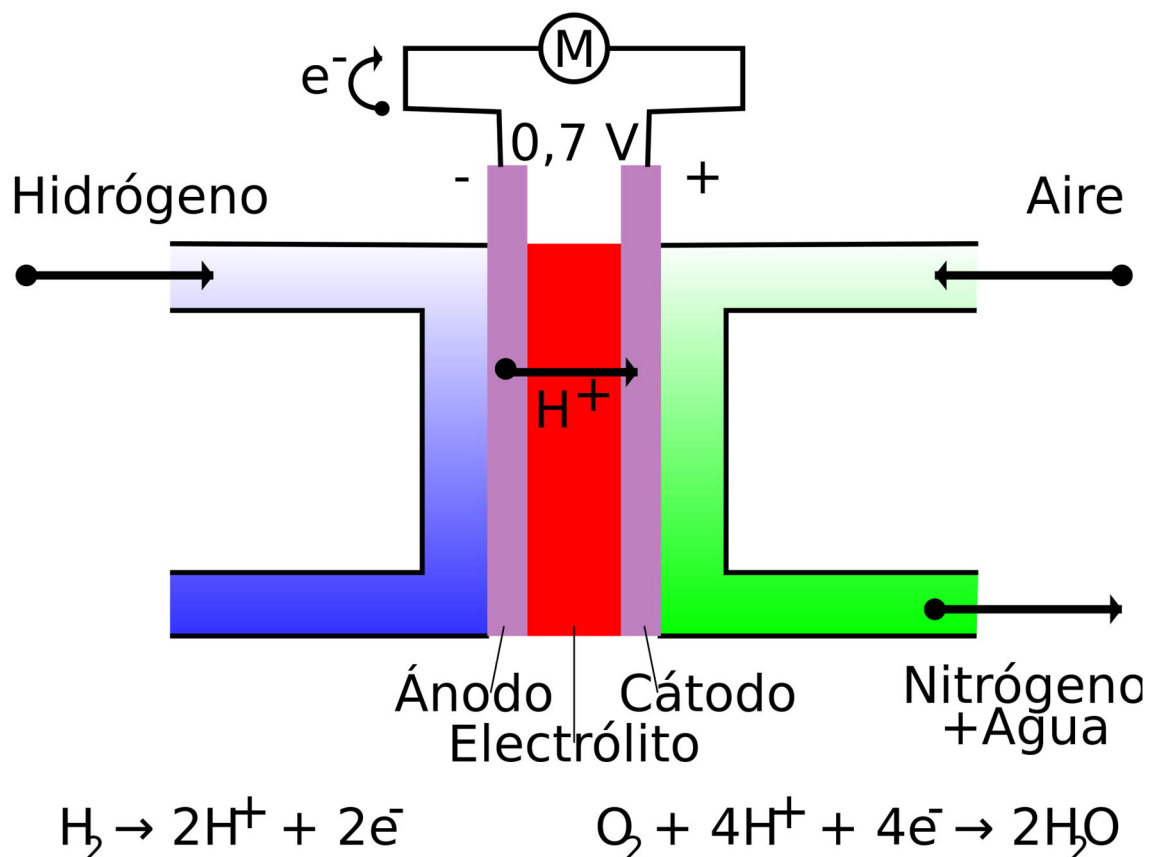


Figura 10.- Pila de combustible de hidrogeno sistema de volante de inercia. Fuente: Wikipedia

## 2.8.- PILAS Y BATERÍAS.

En este apartado profundizaremos más que en los anteriores debido a que es el sistema con más investigaciones publicadas en los últimos tiempos y tiene una tendencia claramente creciente.

Las baterías son una forma de almacenamiento de energía química, están compuestas por una o más celdas y estas celdas se componen de un electrolito que puede ser líquido, pasta o sólido y por dos electrodos separados por una membrana, el ánodo que es el negativo y catodo que es el positivo. Las celdas se pueden conectar en serie o paralelo, en serie se consigue una mayor tensión de la batería y en paralelo se consigue mayor intensidad. Durante la descarga se producen reacciones electroquímicas que permiten que los electrones circulen por una carga exterior conectada a los electrodos, estas reacciones son reversibles, de esta manera se puede recargar aplicando una tensión a los electrodos y se basa en un proceso reducción-oxidación.

Estos equipos tienen una autodescarga considerable y su coste está relacionado con la densidad de energía. Las baterías inicialmente las podríamos clasificar en dos grupos; las baterías convencionales y las baterías de flujo, más adelante veremos cada característica de estos equipos.

Las baterías convencionales se pueden clasificar en función de los componentes que utiliza mientras que las baterías de flujo se pueden clasificar en dos grupos, las de flujo puro y las de flujo híbrido.

A continuación, veremos las características que se utilizan para definir y comparar las baterías.

### Capacidad

La capacidad de las baterías se mide en Ah, siendo esta la máxima energía que puede suministrar en una descarga completa, partiendo de la máxima carga, la capacidad viene determinada por el área de las placas, la porosidad de estos electrodos y la calidad del electrolito, con lo cual esta característica se va deteriorando con el tiempo y el uso. La capacidad también está condicionada con el tiempo de descarga, es decir si se descarga muy rápidamente la capacidad se reduce, si el ritmo de descarga es muy lento se incrementa la capacidad. De este concepto sale la tasa C que se usa para caracterizar las baterías, esta tasa es una media de la velocidad a la que se descarga o se carga una batería. Por ejemplo, una tasa de 1C para una batería de 100Ah significa que es capaz de entregar 100A y una 5C para esta batería entregaría una corriente de 500A.

También la temperatura es un efecto determinante de la capacidad, las baterías disminuyen su capacidad frente a temperaturas bajas, esto no significa que le favorezca las temperaturas altas, si incrementamos las temperaturas intencionadamente disminuiríamos la vida de esta.

### Vida útil

Esta característica de la batería se expresa en la cantidad de ciclos de carga y descarga que puede soportar el equipo sin que se vea afectado el rendimiento estipulado o el 80% de su capacidad. Hay varios aspectos que influyen en la vida útil de las baterías uno de ellos es el BSCO (Battery State of Charge) estado de carga, que viene a ser la capacidad de la batería actual con respecto a su nominal, es decir una batería de 100Ah que se encuentra al 80% almacena 80Ah. Otro factor es el DOD (Depth of Discharge), profundidad de descarga, es complementario al BSCO a medida que uno aumenta el otro disminuye. Una batería completamente descargada tiene un DOD del 100% y una

completamente cargada tiene un DOD del 0%. Las recomendaciones para alargar la vida de las baterías son trabajar entre el 80% y el 20 de su capacidad. El siguiente factor que influye en la vida útil de las baterías son los regímenes de carga y descarga. Unas cargas o descargas rápidas disminuyen la vida útil de las baterías, debido a que las reacciones químicas no pueden mantener la velocidad y acaban produciendo reacciones químicas incompletas y no deseadas que conllevan la reducción de capacidad.

### **Autodescarga**

La autodescarga es un efecto que sufren los sistemas de almacenaje de energía y se corresponde con la pérdida de energía almacenada, aunque no se encuentre en uso, es decir, que no tenga ninguna carga conectada. Este efecto depende de los materiales que se utilizan para la reacción química, y de la temperatura a la que se encuentra la batería.

### **Efecto memoria**

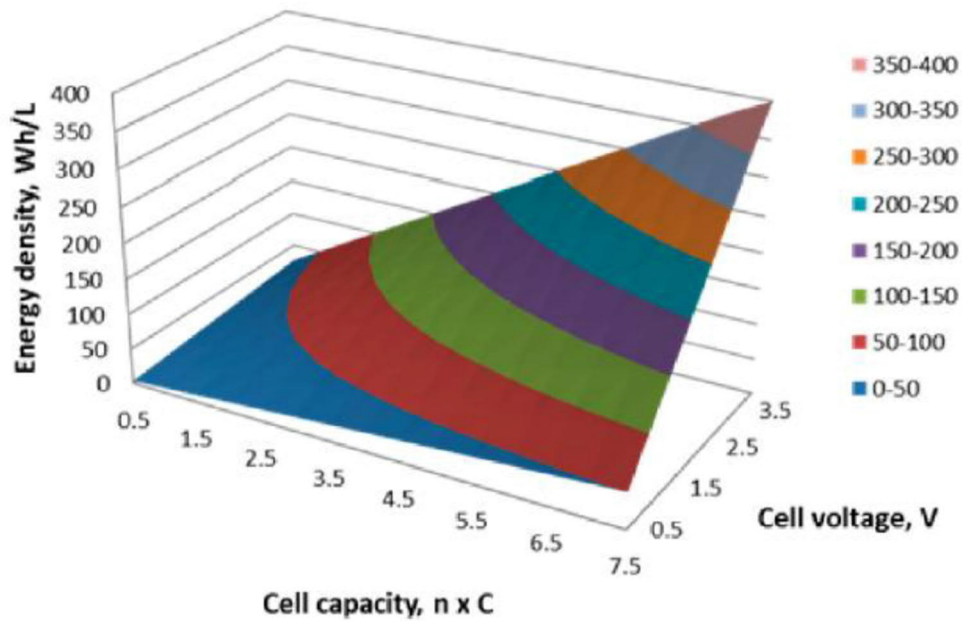
Este efecto está relacionado con los componentes de las baterías y con su edad o uso. Implica una pérdida en la capacidad de la batería, derivado de ciclos de carga descarga incompletos, se refiere a que la batería puede utilizar el valor de donde se partía para las cargas anteriores como su nivel mínimo. En las celdas se crean unas estructuras cristalinas en los electrodos que reducen su capacidad

### **Resistencia de serie interna**

La resistencia de la serie interna determina la corriente máxima de descarga. Para las baterías diseñadas para aportar altas corrientes en un periodo de tiempo corto se requieren equipos con una baja resistencia de serie interna. Esta característica de las baterías, como la mayoría, va deteriorándose con la edad y el uso, la resistencia va incrementándose con el tiempo debido a la degradación de los componentes.

### **Densidad.**

Esta es una característica que se utiliza muy a menudo para la comparativa entre diferentes sistemas de almacenamiento de energía. La densidad de energía es la capacidad de una batería o sistema de almacenamiento dividido por su peso, como se puede observar, esto cobra una gran importancia cuando se trata de dispositivos de almacenaje destinados a elementos móviles o cuando se tiene que transportar a sitios remotos donde su transporte puede incrementar mucho el coste del equipo [15] (Ana Barbón Núñez UNIVERSIDAD DE OVIEDO Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Página 2 de 118 Índice n.d.)



Grafica 1 - Densidad de energía teórica en función del número de electrones, la concentración de las especies activas y el voltaje de la celda [15](Ana Barbón Núñez UNIVERSIDAD DE OVIEDO Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón  
Página 2 de 118 Índice n.d.)

### 2.8.1. BATERÍA PLOMO ACIDO.

Este sistema de almacenamiento se remonta a mediados del 1800. Este sistema en un electrodo negativo de plomo esponjoso (Pb), un electrodo positivo de dióxido de plomo (PbO<sub>2</sub>) sumergidos ambos en ácido sulfúrico diluido como electrolito (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+H<sub>2</sub>O), tal y como se muestra en la figura 10.

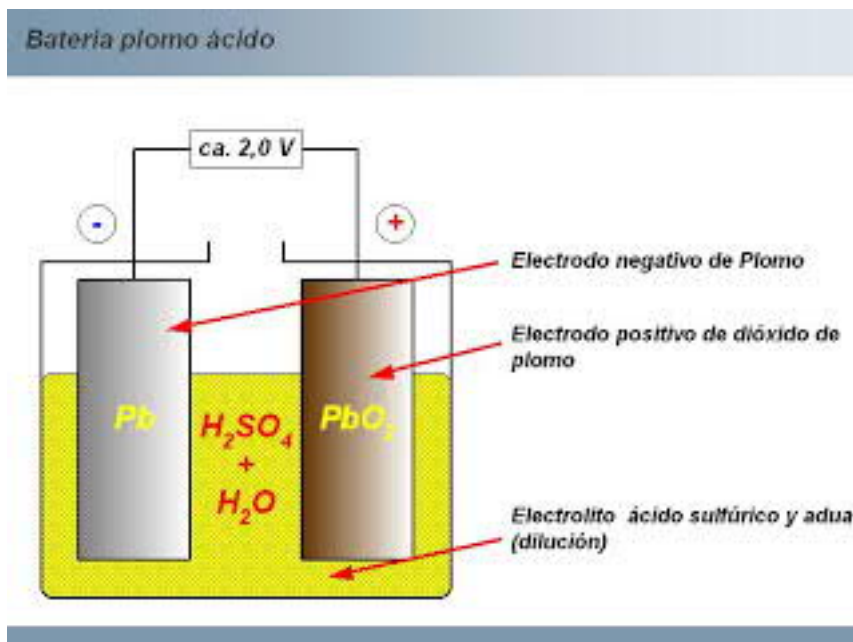
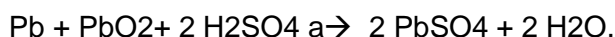


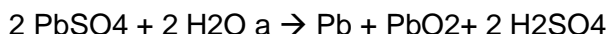
Figura 11.- esquema de una batería de plomo acido. (labateriadeplomo.blogspot.com)



En el proceso de descarga reaccionan los materiales activos y se produce sulfato de plomo, debido a este sulfato la batería se descarga en exceso o se mantiene descargada largos periodos de tiempo. El sulfato se cristaliza y crecen con lo que se hace más difícil de romper durante la recarga de la batería [16] (Vazquez et al. 2010). Se puede expresar el proceso de descarga de la siguiente manera:



En el proceso de carga se aplica una tensión desde una fuente externa y el proceso es a la inversa:



Como el ácido sulfúrico de las baterías está disuelto en agua durante la carga, se sobre carga si hay pérdidas de agua debido a la producción de hidrogeno en el electrodo positivo. Esto hace que alguna vez se tenga que añadir agua destilada, las baterías sin mantenimiento disponen de una válvula para permitir la recombinación del hidrogeno y el oxigeno

Este tipo de baterías tienen una baja densidad de energía, debido a la utilización de plomo y el peso de este, cosa que penaliza en W/Kg. Además, hay que tener en cuenta que el plomo es propenso a la corrosión al estar expuesto al electrolito de ácido sulfúrico. Son utilizadas en aquellas aplicaciones donde la densidad de carga y la vida útil no son un problema y prevalece la robustez y tolerancia, como puede ser para el arranque en la automoción, iluminación e ignición, baterías ininterrumpidas fuentes de alimentación (UPS), estos sistemas utilizan diseños planos con placas de rejilla, mientras que los diseños más avanzados son tubulares y las avances más recientes utilizan carbono en sustitución del plomo para aumentar la potencia y la densidad de energía [16] (Vazquez et al. 2010).

Esta tecnología madura y se dispone de una infraestructura suficiente para reciclar los equipos después de su vida útil, buena relación de coste rendimiento, poseen una baja tasa de autodescarga y tienen tolerancia a las sobrecargas. Por su contra, los materiales que se utilizan son dañinos para el medio ambiente, baja densidad de energía y son sensibles a las descargas profundas.

### 2.8.2 BATERÍA SODIO- AZUFRE.

Este sistema está compuesto por azufre fundido (S) en el cátodo y sodio (Na) fundido en el ánodo, separado por un electrolito cerámico de beta-alúmina sólida, que solo permite la circulación de los iones de sodio positivos que se combinan con el azufre para acabar formando polisulfuros de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_x$ ) como se muestra en la figura 11. [15] (Ana Barbón Núñez UNIVERSIDAD DE OVIEDO Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Página 2 de 118 Índice n.d.)

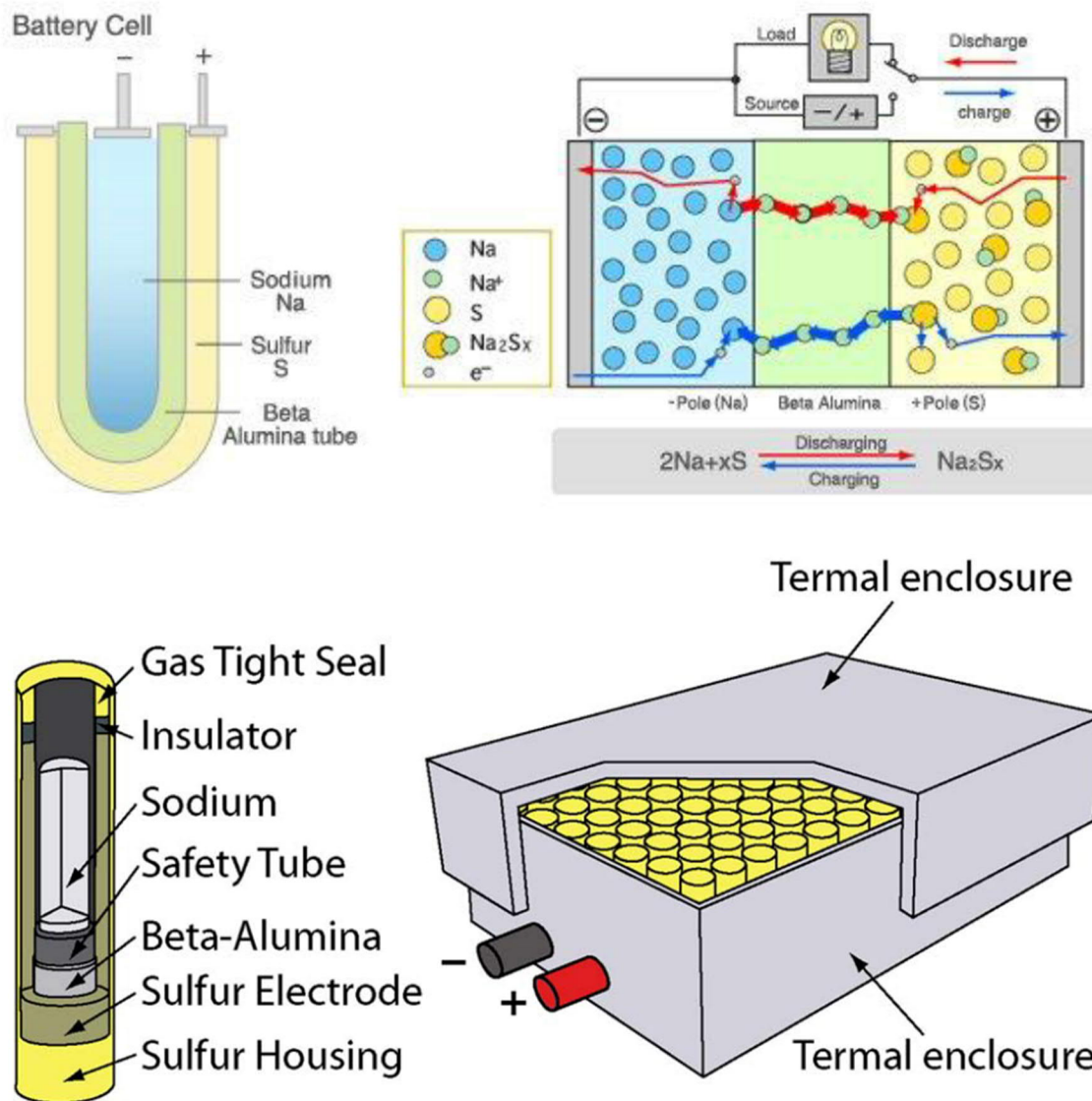


Figura 12.- Esquema de una batería sodio azufre. [15], [16](Ana Barbón Núñez UNIVERSIDAD DE OVIEDO Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Página 2 de 118 Índice n.d.),

La temperatura de funcionamiento de estos equipos está entre 300 y 360°C, con lo que estas baterías deben ser calentadas para conseguir su funcionamiento óptimo.

Durante la descarga los electrones circulan por la carga externa de la batería desde el electrodo negativo hacia el positivo formando polisulfuro en este electrodo. Por el interior circulan los iones positivos de sodio para equilibrar el flujo de cargas, durante el periodo de carga el funcionamiento es el inverso.

Entre las ventajas de estos equipos encontramos la alta densidad de energía comparada con otros tipos de baterías como las de plomo ácido o las de flujo redox, no utilizan materiales tóxicos, tienen una larga vida útil en la actualidad rondan los 5000 ciclos, presenta una autodescarga baja, requieren poco mantenimiento y proporcionan una respuesta rápida, los materiales para su producción son abundantes en la naturaleza, cosa que favorece su producción en masa y su bajo coste.

En su contra hay que decir que para el funcionamiento de estos equipos es necesario aplicarles calor desde una fuente externa, debido a sus altas temperaturas de funcionamiento, cosa que hace que el rendimiento se vea disminuido, debido a esto



también se reduce su ámbito de aplicación siendo este principalmente estático e incrementa los costes de operación

### 2.8.3 BATERÍA NIQUEL – CADMIO Y NÍQUEL-HIDRURO METÁLICO

Estas baterías están compuestas por oxihidroxido de níquel ( $\text{Ni(OH)}_2$ ), en el electrodo positivo y de cadmio metálico (Cd) para el electrodo negativo, en el electrolito se utiliza una solución de hidróxido de potasio (KOH), los electrodos se encuentran aislados por un separador. Este sistema de baterías fue la elección para muchas aplicaciones de alto rendimiento entre el 1970 y 1990, aunque en la actualidad algunos de estos sistemas están sustituyendo estos equipos por baterías de Ion de litio y NiMH.

La batierais de NiCd presenta una mayor densidad de energía y un ciclo de vida más largo que las baterías de plomo acido, aunque siguen siendo inferiores a las de ion de litio y NiMH

Las baterías de NiCd se le pueden atribuir las siguientes ventajas, tienen un alto rango de temperatura, hasta los  $70^\circ\text{C}$ , buena tolerancia a las descargas profundas sin deteriorarse, tienen una resistencia interna muy baja, lo que las convierte en una buena solución para conexiones en serie, no requiere mucho mantenimiento, muchas se clasifican como ultra bajo mantenimiento.

Por otro lado, las desventajas de estos dispositivos son que tiene un ciclo de vida más corto, importante efecto memoria, el cadmio es un metal pesado con lo que es muy contaminante y requiere un proceso de reciclaje complejo

Por estas razones las baterías de níquel e hidruro metálico han ido ganando terreno frente a las baterías de NiCd.

Las baterías NiMH usan oxihidroxido de níquel para el electrodo positivo y hidruro metálico para el electrodo negativo, han sido muy usadas en los años noventa sobre todo en coches eléctrico e híbridos tienen una densidad de energía relativamente alta, son seguras y tienen un comportamiento bueno frente al abuso de uso y cuentan con una vida muy larga en estado de carga parcial.

Por contrapartida estas baterías tienen efecto memoria, alto coste y la utilización de materiales contaminantes. El problema de la autodescarga se ha mitigado con la introducción de nuevos separadores, estos equipos no requieren mantenimiento.

Cada vez más las baterías de níquel cadmio van perdiendo cuota de mercado respecto de NIMH.

### 2.8.4. BATERÍA ZINC- AIRE.

Estos equipos están basados en una tecnología con más de un siglo de existencia, en la actualidad vuelve a tener un interés importante debido a su capacidad y su reducido coste frente a las baterías de iones de litio. Para este trabajo nos basaremos en las baterías de zinc aire secundarias, aquellas que son recargables. Las primarias son las que no se pueden recargar y para este estudio en cuestión no nos aplica.

Estos equipos están compuestos por un ánodo de Zinc con un electrodo positivo de carbono poroso que requiere un suministro constante de aire y un electrolito alcalino con un separador. Tiene una densidad de energía teórica entre 2 y 10 veces superior que las baterías de litio, la densidad es de  $1086\text{Wh/kg}$ , se pueden fabricar a un bajo coste unos  $10\$ \text{KWh}$ . En muchas situaciones se plantean estas baterías como sustitutas de las de ion litio para aplicaciones de vehículo eléctrico. Hasta la fecha estos equipos se han usado para aplicaciones médicas y telecomunicaciones, este tipo de baterías a pesar de tener una alta densidad de energía tienen una baja potencia, causada por la

baja eficiencia de los catalizadores de aire. Estos equipos recargables no tienen una larga vida útil, la vida útil se ve afectada por dos factores principalmente la falta de los catalizadores de aires bifuncionales con buen funcionamiento y la disolución y deposición de zinc no uniforme [17](Y. Li and Dai 2014)

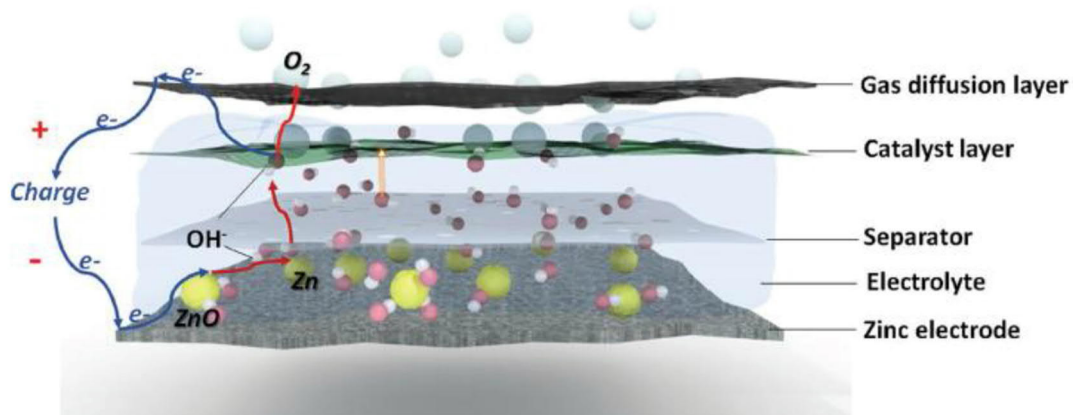


Figura 13- Esquema de un batería Zinc aire. [15](Ana Barbón Núñez UNIVERSIDAD DE OVIEDO Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Página 2 de 118 Índice n.d.)

En el proceso de descarga se produce la oxidación del zinc y formando iones de zincato solubles, este proceso continua hasta que están sobresaturados en el electrolito, después estos iones de zinc se descomponen en óxido de zinc insolubles como se muestra en las siguientes ecuaciones: [17](Y. Li and Dai 2014).

En el ánodo:  $\text{Zn} + 4\text{OH}^- \rightarrow \text{Zn}(\text{OH})_4^{2-} + 2e^-$

Fluido  $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-} \rightarrow \text{ZnO} + \text{H}_2\text{O} + 2\text{OH}^-$

En el cátodo:  $\text{O}_2 + 4e^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{OH}^-$

Reacción global:  $2\text{Zn} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{ZnO}$

Reacción parasitaria:  $\text{Zn} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Zn}(\text{OH})_2 + \text{H}_2$

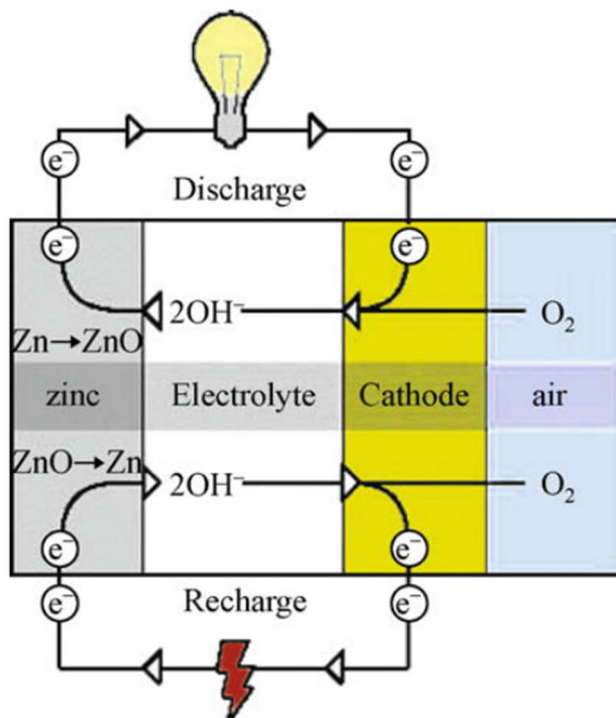


Figura 14- Esquema de carga y descarga baterías Zinc aire. [10](Chen et al. 2009b)

Como ventajas de estos equipos podemos resaltar las siguientes características.

- Alta densidad de energía.
- Materiales abundantes en la naturaleza.
- Posibilidad de fabricación a bajo coste
- Excelente vida útil.
- Materiales no tóxicos.

Por el contrario, podemos nombrar las siguientes desventajas.

- Sensibilidad a temperatura y humedad.
- Los productos químicos tienden a secarse.
- El dióxido de carbono del aire forma carbonato que reduce su conductividad.
- Alta resistencia interna.
- La evolución de estos sistemas recargables todavía no está madura, se ve obstaculizada por la disposición no uniforme de Zn.

## 2.8.5. BATERÍA DE LITIO

La tecnología de las baterías de iones de litio es relativamente nueva, se descubrieron en los 70, pero no se llegaron a comercializar hasta principios de los 90, llegándose a convertir en la tecnología de almacenamiento más relevante en los productos electrónicos de consumo. El litio es el tercer elemento más ligero de la tabla periódica y presenta uno de los radios iónicos más pequeños de todos los iones cargados, esto hace que tengan una alta capacidad gravimétrica y volumétrica y alta densidad de potencia. [20] (Nitta et al. 2015)

La composición estándar de estos equipos de almacenamiento de energías es la siguiente:[18](Solanich 2017)

- El colector negativo, se trata de una lámina metálica de cobre que se encarga de conducir los negativos desde el ánodo hacia fuera en la descarga y desde fuera hacia el ánodo en el proceso de recarga.

- El electrodo negativo por lo general es de grafito litio, en este electrodo se producen las reacciones de oxidación en la descarga.
- El electrolito está compuesto por sales de litio como el (LiPF<sub>6</sub>) disueltas en carbonatos orgánicos. [10(Chen et al. 2009b)]
- Separador polimérico, es una membrana que deja pasar los iones de litio, pero no los electrones, separa las dos celdas de las baterías.
- El electrodo positivo, cátodo, es donde se produce la reacción de reducción durante la descarga, suele ser principalmente de óxido metálico.
- El colector positivo, suele estar fabricado con una placa de aluminio, que en la descarga conduce los electrones hacia el electrodo positivo, durante la carga a la inversa desde el electrodo positivo hacia el exterior.

Estas partes de la batería y su proceso de carga y descarga se puede ver en la figura 13:

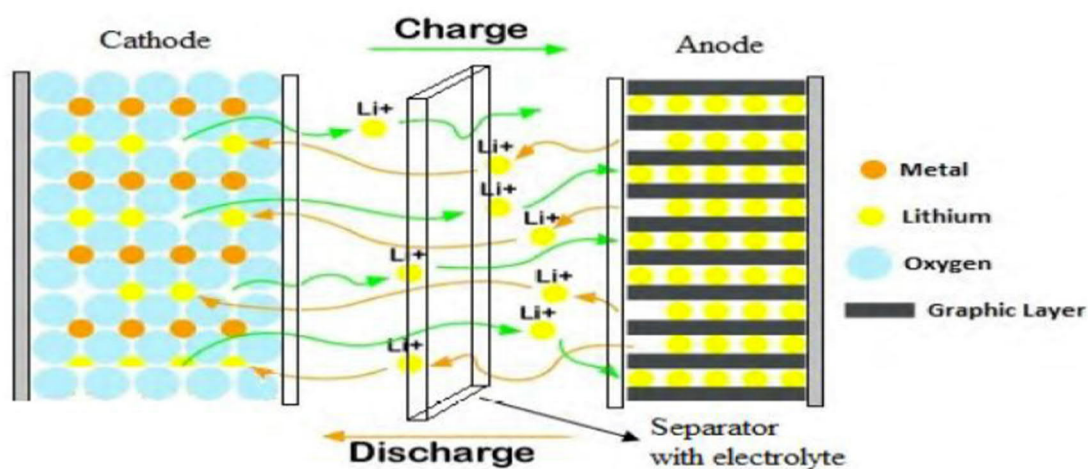


Figura 15 - Esquema de batería de ion de litio. [15] (Ana Barbón Núñez UNIVERSIDAD DE OVIEDO Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Página 2 de 118 Índice n.d.)

Las ventajas de estas las baterías de litio son:

- Una alta Densidad de energía. Aproximadamente 200Wh/Kg
- No tienen efecto memoria.
- Baja autodescarga.
- Altos niveles de voltaje de celda (3.6V)
- Alta capacidad y velocidad de carga/descarga.
- Alta capacidad de ciclos de carga descarga cerca de 5000 ciclos.
- Alta velocidad de respuesta ante variaciones de carga.
- Alta eficiencia entre el 95 %y 98%

Desventajas.

- Altos costes y con tendencias al alza.
- Utilización de recursos limitados.
- Se pueden producir calentamientos internos.
- Necesita un sistema de gestión de la batería.
- Algunos electrodos pueden degradarse y descargarse por completo.

Aplicaciones principales: dispositivos portátiles como ordenador, cámaras, teléfonos, herramientas, vehículos eléctricos e híbridos.

Gracias a las ventajas de estos equipos se ha propiciado mucha investigación sobre estos sistemas, hecho que ha conseguido una mejora importante y las ha colocado como la tecnología dominante en el sector de la electrónica móvil y vehículo eléctricos como coches, patinetes, bicis, etc.

Se han desarrollado muchas variaciones de la química básica de litio con la intención de mejorar las celdas con diferentes combinaciones de materiales, cada combinación ofrece unas características propias, rendimiento, coste y seguridad, a menudo se basan en la modificación de los materiales en el cátodo, electrodo positivo. [15] (Ana Barbón Núñez UNIVERSIDAD DE OVIEDO Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Página 2 de 118 Índice n.d.)

Las baterías de litio se pueden clasificar en los siguientes grupos según los materiales que las componen:

- Óxido de cobalto-Litio. ( $\text{LiCoO}_2$ )
- Óxido de magnesio-litio ( $\text{LiMnO}_4$ )
- Fosfato Hierro-Litio ( $\text{LiFePO}_4$ ).
- Óxido de Cobalto-Magnesio-Níquel-Litio ( $\text{LiNiMnCoO}_2$ ).
- Óxido de Aluminio-Cobalto-Níquel-Litio ( $\text{LiNiCoAlO}_2$ ).
- Óxido de Titanio-Litio ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ )

#### 3.8.5.1. Óxido de cobalto-Litio. ( $\text{LiCoO}_2$ )

La estructura básica de una batería recargable de cobalto-litio está compuesta por un cátodo formado por capas intercaladas, un electrolito líquido no acuoso de sal de  $\text{LiPF}_6$  con un disolvente orgánico, y un ánodo normalmente de grafito, tal como se muestra en la figura 14

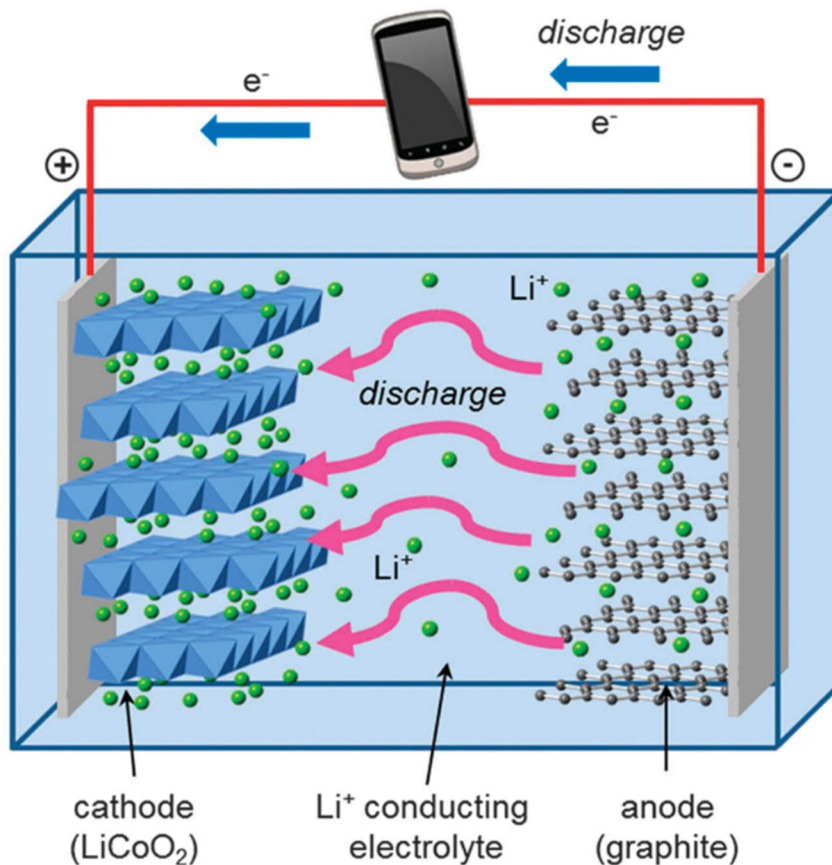


Figura 16- Esquema de batería de ion de LiCoO<sub>2</sub>, [19] (Fisher et al. 2014).

En la figura 14 se muestran la composición del cátodo siendo los iones de litio las esferas verdes y los octaedros azules las capas de CoO<sub>6</sub>. Durante la descarga se puede observar la siguiente reacción:

Ánodo:  $Li_xC_6(s) \rightarrow xLi^+(soln) + 6C(s) + xe^-$ .

Cátodo:  $Li_{1-x}CoO_2(s) + xLi^+(soln) + 6C(s) + xe^- \rightarrow LiCoO_2(s)$ .

Durante el proceso de carga de la batería los iones de litio van desde el LiCoO<sub>2</sub> a través de electrolito y se intercalan con las láminas de grafito del ánodo.

Durante la descarga los iones de litio van del ánodo al cátodo a través del electrolito mientras que los electrones, circulan por la carga exterior de las baterías.

El cátodo es uno de los elementos limitantes en las baterías de iones de litio debido a la cantidad de litio que se puede extraer y volver a insertar influye en la capacidad y su energía Fermi afecta al voltaje de la celda. [19] (Fisher et al. 2014).

Este tipo de baterías se caracterizan por estar basados en una tecnología madura y probada en la industria. Tienen una alta densidad de carga y su uso es habitual en teléfonos móviles, tabletas, ordenadores portátiles, cámaras y otros equipos portátiles. Sin embargo, al estar el cátodo compuesto por cobalto tienen un gran inconveniente puesto que este material es tóxico y nocivo para el medio ambiente, esto hace que la siguiente generación de estos sistemas de almacenamiento tenga que usar otros materiales para el cátodo. También se puede considerar que la vida útil es corta, disponen de una baja estabilidad térmica y una capacidad de carga o descarga limitada,



es decir no se puede cargar o descargar la batería con corrientes superiores que la clasificada, esto les puede causar un estrés y acabar explotando. [15] (Ana Barbón Núñez UNIVERSIDAD DE OVIEDO Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Página 2 de 118 Índice n.d.)

Podemos seguir nombrando capacidades de las LCO como su capacidad teórica específica alta de 274 mAh/g, alta capacidad volumétrica teórica 1363 mAh/cm<sup>3</sup>, baja autodescarga, alto voltaje de descarga y buen rendimiento de ciclo. Como contras tenemos su coste derivado del uso del cobalto, la capacidad de desvanecimiento frente a altas tasas de corriente o durante ciclos profundos y ya nombrada baja estabilidad térmica que puede provocar un estallido en llamas, es la composición de cátodo con la estabilidad térmica más baja de los que se comercializan y experimentan un escape térmico más allá de unos 200°C debido a una reacción exotérmica entre el oxígeno liberado los materiales orgánicos. [20] (Nitta et al. 2015)

#### 2.8.5.2. Óxido de magnesio-litio (LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>).

Este tipo de baterías se utiliza para herramientas, equipos médicos y vehículos eléctricos e híbridos, la estructura del cátodo de esta batería es la de espinela cúbica tal y como se muestra en la siguiente figura 15 siendo las esferas verdes los iones de litio y los octaedros de color malva el óxido de manganeso. [15] (Ana Barbón Núñez U UNIVERSIDAD DE OVIEDO Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Página 2 de 118 Índice n.d.)

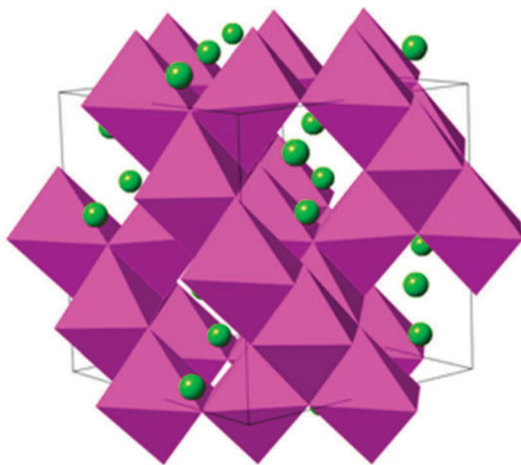


Figura 17- Esquema de la estructura del cátodo de una batería  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  [19] (Fisher et al. 2014).

Esta estructura favorece el flujo de electrones en el electrodo lo que conlleva una reducción de la resistencia interna, con esta estructura también se consigue una mayor estabilidad térmica y mejorar su estabilidad, pero sus ciclos y vida útil siguen siendo limitados.

Este tipo de baterías se diferencian respecto a las Litio-Cobalto en las siguientes características:

- Tienen un mayor voltaje nominal.
- Una mayor vida útil.

- Sufre una disminución de la densidad de energía de un 20%.
- Son más estables.
- Son más seguras.
- El Manganeseo es menos perjudicial para el medio ambiente.
- El manganeso no es toxico.

### 3.8.5.3. Fosfato Hierro-Litio ( $\text{LiFePO}_4$ ).

Estas baterías presentan un rendimiento electroquímico con baja resistencia siendo posible con materiales de fosfato y estructura manométrica, una alta clasificación de corriente, una vida útil prolongada, estabilidad térmica pudiendo llegar a trabajar en altas temperaturas sin llegar a descomponerse con un rango de temperaturas de funcionamiento aproximado de  $-30^\circ\text{C}$  a  $60^\circ\text{C}$ , una tolerancia al abuso de uso y una mayor seguridad, más tolerante a cargas completas. Como el resto de las baterías reduce su rendimiento al trabajar en rangos de temperaturas bajo y el almacenaje en temperaturas altas acorta su vida, aun así, sigue siendo mejor que el NiCd y el NiMH, estos equipos reducen la problemática causada por el cobalto en el ámbito de toxicidad y medioambiental. Como contra, estos equipos tienen una autodescarga superior que otros equipos de baterías de ion de litio, un voltaje de celda menor y puede requerir equipos electrónicos para mitigar su auto descarga. A pesar de esto estos equipos son atractivos para aplicaciones estacionarias [15] (Ana Barbón Núñez UNIVERSIDAD DE OVIEDO Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Página 2 de 118 Índice n.d.)

La estructura del cátodo es una estructura olivina como se muestra en la figura 16, donde las esferas de color verde son los iones de litio, poliedros de Fe – O en marrón y tetraedros de  $\text{PO}_4$  en púrpura.

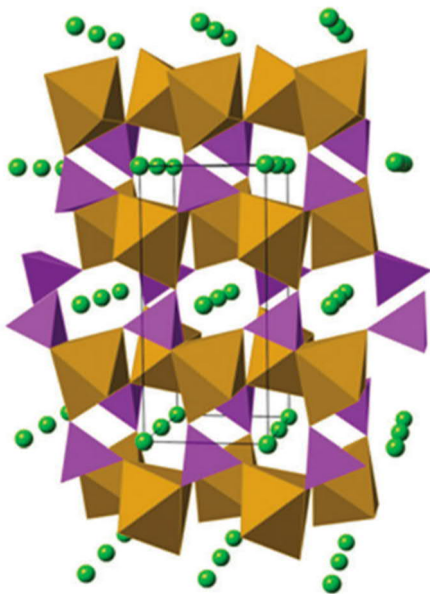


Figura 18- Esquema de la estructura del cátodo de una batería  $\text{LiFePO}_4$  [19] (Fisher et al. 2014).



#### 2.8.5.4. Óxido de Cobalto-Magnesio-Níquel-Litio ( $\text{LiNiMnCoO}_2$ ).

Este tipo de celdas han surgido como la evolución de las celdas de litio- cobalto, a partir de investigaciones que con el afán de reducir costes han intentado combinar o reducir el cobalto por materiales menos costoso y que conserven la estabilidad estructural, se han convertido en uno de los sistemas de baterías de litio más extendidos.

Las celdas de óxido de Cobalto-Manganeso-Níquel-Litio, también conocidas como NMC combina materiales estratificados con diferentes capas compuesto por Níquel, cobalto y manganeso en proporciones de (1/1/1) o (5/3/2) estas son las proporciones más utilizadas, aunque algunas veces los fabricantes utilizan otras proporciones como (4/4/1), la reducción de la cantidad de cobalto hace que incremente su estabilidad térmica [15] (Ana Barbón Núñez UNIVERSIDAD DE OVIEDO Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Página 2 de 118 Índice n.d.).

Una de las ventajas de estas celdas es gracias a la combinación del níquel con el manganeso, aprovechando la alta energía específica del níquel y compensado su baja estabilidad con la estructura espinela de manganeso que le da una baja resistencia interna. Estas características influyen en que tengan una buena combinación de potencia, energía y vida útil, pero les otorga un voltaje de celda ligeramente más bajo. Estas celdas son las preferidas para sistemas estacionarios y para aplicaciones de movilidad eléctrica como bicicletas y trenes de potencia eléctrica, debido a su alta.

La capacidad de estas celdas es similar o mayor que las LCO pero tienen un voltaje de funcionamiento similar, tienen un coste más reducido puesto que se reduce la cantidad de cobalto, se ha llegado a conseguir capacidades específicas reversibles de unos 234 mAh/g mediante la utilización de formaciones macro porosas y tienen una buena estabilidad de ciclo hasta los 50°C.[20] (Nitta et al. 2015)

#### 2.8.5.5. Óxido de Aluminio-Cobalto-Níquel-Litio ( $\text{LiNiCoAlO}_2$ ).

También conocidas como NCA, tienen características similares a las NMC como la alta energía específica, potencias razonablemente buenas y una vida útil larga. En términos de seguridad y costes mejoran a las de litio-cobalto, pero no llegan a alcanzar a las NMC. Con lo que son equipos que mejoran los costes y la seguridad de las baterías de óxido de cobalto sin llegar a comprometer la densidad de energía, aunque sí que se ve un poco disminuido el voltaje de celda, esto hace que sea una de las tendencias de producciones en el sector de la movilidad [15] (Ana Barbón Núñez UNIVERSIDAD DE OVIEDO Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Página 2 de 118 Índice n.d.) .

Estos equipos están comercialmente extendidos como por ejemplo en las baterías de Panasonic para Tesla. Cuentan con características como una alta capacidad de descarga utilizable de más o menos 200 mAh/g, una larga vida de almacenamiento comparado con las de cobalto, sufre una degradación a temperaturas relativamente altas entre 40 y 70°C debido al crecimiento de la interfaz de electrolito sólido y a el crecimiento de microgrietas. [20] (Nitta et al. 2015)

#### 2.8.5.6. Óxido de Titanio-Litio ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ).

También llamadas LTO, estas baterías modifican la estructura del ánodo, utilizando nano cristales de titanio de litio para recubrir la superficie del ánodo, dándole una superficie mucho mayor que el carbono, esto propicia un mayor flujo de electrones que conlleva una velocidad superior de carga y descarga.

Estos ánodos basados en Ti presentan una excelente estabilidad de ciclo, cero cambios estructurales, excelente reversibilidad de ciclo y un alto voltaje que garantizan una mayor seguridad, sin embargo, estos sistemas presentan una capacidad de velocidad relativamente baja debido a una alta polarización de los materiales a velocidades altas de carga y descarga debido a su baja conductividad eléctrica. En consecuencia, con el potencial de estos equipos se han desarrollado muchas investigaciones para mejorar su conductividad eléctrica mediante el dopaje iónico, la modificación de la superficie y la difusividad iónica [21](Zhu, Wang, and Xia 2012).

En la figura 17 se muestra la estructura de un ánodo LTO.

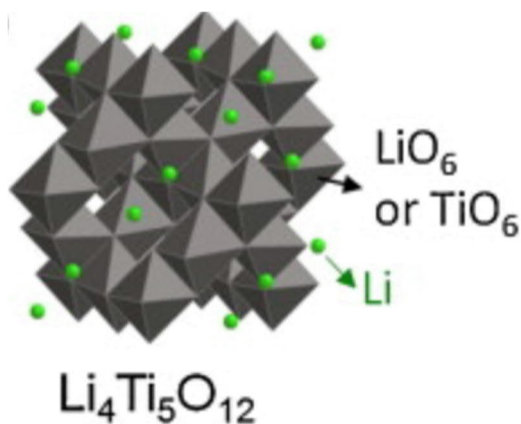


Figura 19- Esquema de la estructura del cátodo de una batería LTO [21](Zhu, Wang, and Xia 2012).

Gracias al mayor potencial de referencia del titanio comparado con el grafito el voltaje de celda se reduce, con lo que también se ve reducida la densidad de energía máxima. Aun así, sigue siendo mayor que las de plomo y las de níquel-cadmio, reduce la densidad, pero incrementa su seguridad respecto al resto de las baterías de ion de litio. El alto potencial del ánodo evita problemas relacionados con la descomposición del electrolito que podría provocar el crecimiento o ruptura del electrolito sólido y su tendencia al envejecimiento o deterioro por sobrecalentamiento. Esta es la tecnología de ion-litio más duradera, teniendo una vida útil de ciclo de hasta 10.000 ciclos completos. Debido a sus bajos volúmenes de producción mundial los precios de adquisición son elevados, por lo que muchas investigaciones en este ámbito se centran en la reducción de coste.

A modo resumen se pueden ver las características de las diferentes baterías de Litio mencionadas en la siguiente tabla.

	Capacidad específica (mAh/g)	Voltaje nominal (V)	Energía específica (Wh/kg)	Vida útil (ciclos)	Aplicaciones
Óxido de Aluminio-Cobalto-Níquel-Litio (NCA)	180	3,6	200 - 260	500	Dispositivos médicos, industrial, trenes eléctricos...
Óxido de Cobalto-Manganeso-Níquel-Litio (NMC)	160	3,6-3,7	150 - 220	1000 - 2000	Bicicletas eléctricas, dispositivos médicos, vehículo eléctrico, industria...
Óxido de Cobalto-Litio (LCO)	155	3,6	150 - 200	500 - 1000	Móviles, tablets, portátiles, cámaras...
Óxido de Manganeso-Litio (LMO)	146	3,7	100 - 150	300 - 700	Herramientas, dispositivos médicos, trenes eléctricos...
Fosfato de Hierro-Litio (LFP)	160	3,3	90 - 120	1000 - 2000	Portátil y estacionario que necesita altas corrientes de carga y resistencia...
Óxido de Titanio-Litio (LTO)	170	2,4	50 - 80	3000 - 7000	UPS, tren eléctrico, alumbrado público con energía solar...

Tabla 9-Principales tipos de baterías de ion-litio y principales características. [15]

## 2.8.6 BATERÍA DE FLUJO.

Estas baterías recargables tienen la peculiaridad que las sustancias electroactivas están almacenadas en tanque y son impulsadas hacia la cámara de reacción electroquímica mediante bombas, estas sustancias electroquímicas son los electrolitos y están en compuestas por sustancias electroactivas disueltas, la celda electroquímica donde son impulsados los electrolitos dispone de un separador de membrana para evitar la mezcla del electrolito positivo del negativo. La densidad de energía de estos equipos viene dada por el volumen de los depósitos de electrolito y no depende del tamaño de las celdas, mientras que la densidad de potencia sí que viene condicionada por el volumen o diseño de las celdas. Los principales diseños de estas baterías son bromuro de polisulfuro (PSB), redox de vanadio (VRB) y bromuro de zinc. [22](Koohi-Fayegh and Rosen 2020) Estos equipos presentan problemas de costos derivados de los materiales especialmente aquellas que utilizan metales redox-activos y electrocatalizadores de metales preciosos. Hay investigaciones para la realización de baterías de flujo libres de metal, basadas en química redox que sufren una reacción extremadamente rápida y reversible de dos electrones y dos protones en un electrodo de carbonato de vítrio en ácido sulfúrico. Estas baterías de quinona-bromuro demuestran una retención de capacidad de almacenamiento superior al 99% por ciclo. Otro campo para mejorar estas baterías es el de aumento de la energía y la densidad de potencia. [22](Koohi-Fayegh and Rosen 2020)

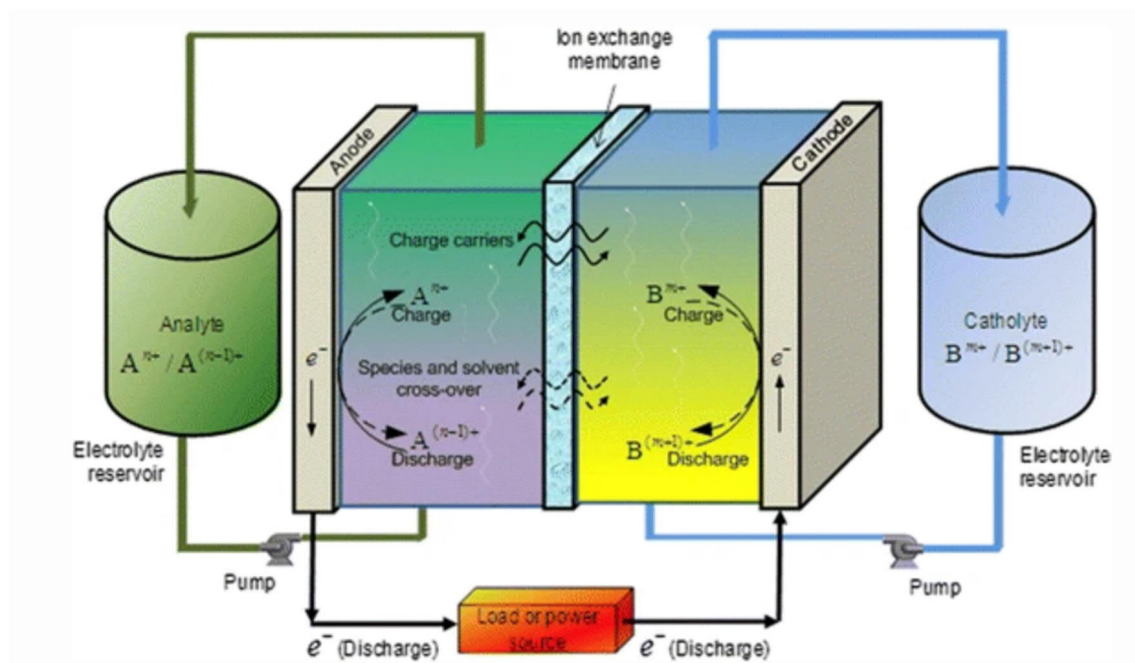


Figura 20- Esquema de una batería de flujo redox [23](Weber et al. n.d.).

Como ventaja de estos equipos podríamos nombrar:

- Tecnología estable y modular debido a la independencia de la energía y la potencia, pudiendo diseñar tanque y celdas para que el conjunto se adecue a las características buscadas.
- Vida útil elevada, superior a los 10.000 ciclos.
- Elevada tasa de descarga sin daños.
- Alta seguridad térmica, el flujo de electrolito le beneficia en la reducción de la temperatura de la celda.
- Rápida recarga, se puede revertir la reacción aplicando electricidad o bien se pueden sustituir los electrolitos.
- Tienen un bajo mantenimiento.
- Se puede suspender el funcionamiento de la batería simplemente apagando las bombas.
- Respuesta rápida del orden de milisegundos
- Puede operar a temperaturas cercanas a la del ambiente

Como contras observamos:

- La baja densidad de energía comparado con otros sistemas de almacenamiento.
- Requerimientos de sistemas periférico a la celda como bombas, sensores, gestión de flujo, gestión de potencia.
- Elevado volumen de ocupación del conjunto, debido a la utilización de tanques de almacenamiento de electrolito.
- Tecnologías poco maduras
- Toxicidad de algunos elementos

[15] (Ana Barbón Núñez UNIVERSIDAD DE OVIEDO Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Página 2 de 118 Índice n.d.)

### 2.8.6.1. Baterías de flujo zinc-bromo.

También conocidas con las siglas (ZBFB), este tipo de baterías se incluyen en el grupo de híbridas, debido a que tan solo uno de los materiales activos se almacena externamente. Este tipo de baterías están formadas por dos electrodos de carbono separados por una membrana microporosa y dos soluciones electrolíticas, la del Zinc en base acuosa y la del bromo que contiene un compuesto de amina orgánica para mantenerlo en solución, almacenados cada uno en su tanque y con un sistema de bombeo, la membrana de separación evita que el bromo penetre en el compartimento de Zinc. El electrolito principal de estas baterías es de bromuro de zinc ( $\text{ZnBr}_2$ ) disueltos en agua. [15] (Ana Barbón Núñez UNIVERSIDAD DE OVIEDO Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Página 2 de 118 Índice n.d.)

Como características de estas baterías podemos indicar que muestran un mayor voltaje que las baterías de flujo redox de vanadio, la eficiencia energética esta alrededor del 80%, los materiales son abundantes, la vida útil es elevada, buena tolerancia a las descargas profundas, una descarga del 100% no afecta a su rendimiento, no es tan escalable como las baterías de redox vanadio, en las que si se puede diseñar los tanques y las celdas para el correcto dimensionamiento, en este caso de las baterías de zinc la variable que se puede modificar es la de la celda

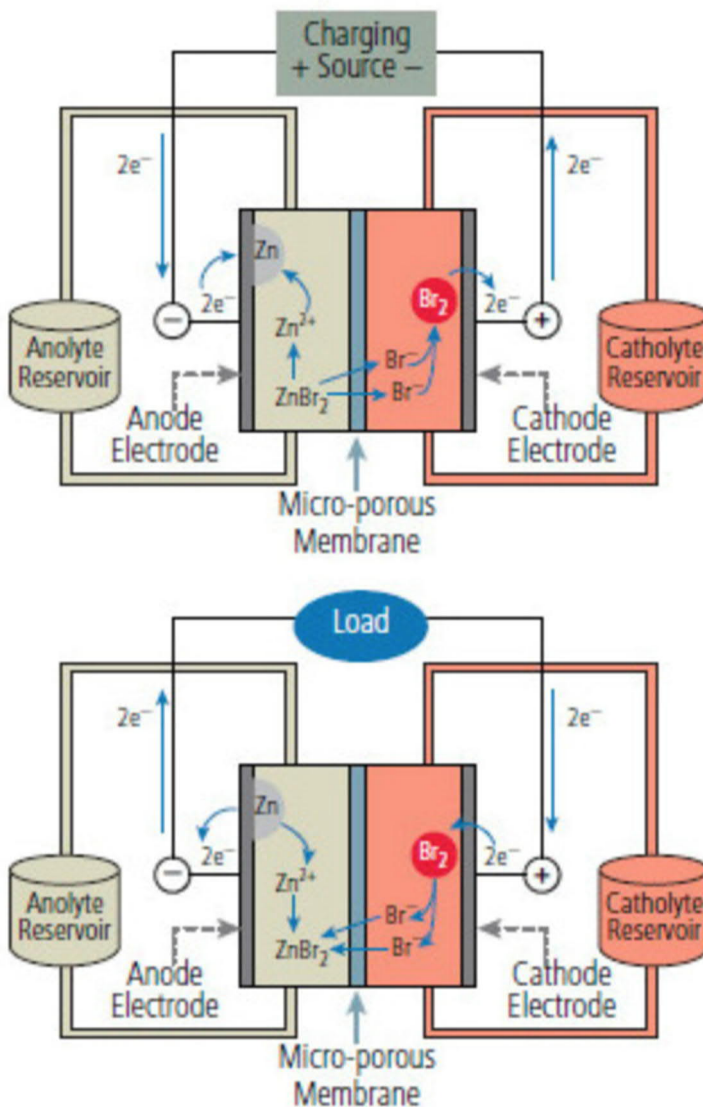


Figura 21- Funcionamiento de una batería redox zinc – bromo [24] (Hernández Romero and para Almacenamiento de Energía n.d.)

<b>Densidad de Energía</b>	72-108 MJ/m <sup>3</sup>
<b>Rango de Energía</b>	36·10 <sup>3</sup> MJ
<b>Rango de Potencia</b>	0,1 – 100 MW
<b>Tiempo de Carga y Descarga</b>	Horas
<b>Ciclos de Carga/Descarga</b>	12.000 ciclos
<b>Rendimiento</b>	75 %
<b>Mínimo Estado de Carga</b>	10 %
<b>Coste de Instalación</b>	385 €/kWh
<b>Coste de Mantenimiento al Año</b>	13 €/kWh

Tabla 5.-Principales características de una batería redox zinc - bromo. [24] (Hernández Romero and para Almacenamiento de Energía n.d.)

#### 2.8.6.2. Batería de flujo redox de Vanadio.

Las baterías de flujo redox de Vanadio también se conocen como VRFB. Es uno de los sistemas de almacenamiento más maduros de las baterías de flujo, sus inicios se remontan a los años 90.[15] (Ana Barbón Núñez UNIVERSIDAD DE OVIEDO Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Página 2 de 118 Índice n.d.)

Estas baterías utilizan como material activo el vanadio en los dos electrodos, en el cátodo y el ánodo, pero con diferente grado de oxidación en el ánodo  $V^{2+}/V^{3+}$  mientras que el material del catodo es  $V^{5+}/V^{4+}$  ambos diluidos en ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), estos materiales son almacenados en los tanques y bombeados hacia la celda en el momento en el que la batería se pone en funcionamiento [31]. La celda de este tipo de baterías está formada igual que la del resto de las baterías de flujo, compuesta por dos electrodos de carbono o grafito, con una membrana de separación que evita la mezcla de los electrolitos activos mientras que permite el paso de los iones de hidrógeno [15] (Ana Barbón Núñez UNIVERSIDAD DE OVIEDO Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Página 2 de 118 Índice n.d.)



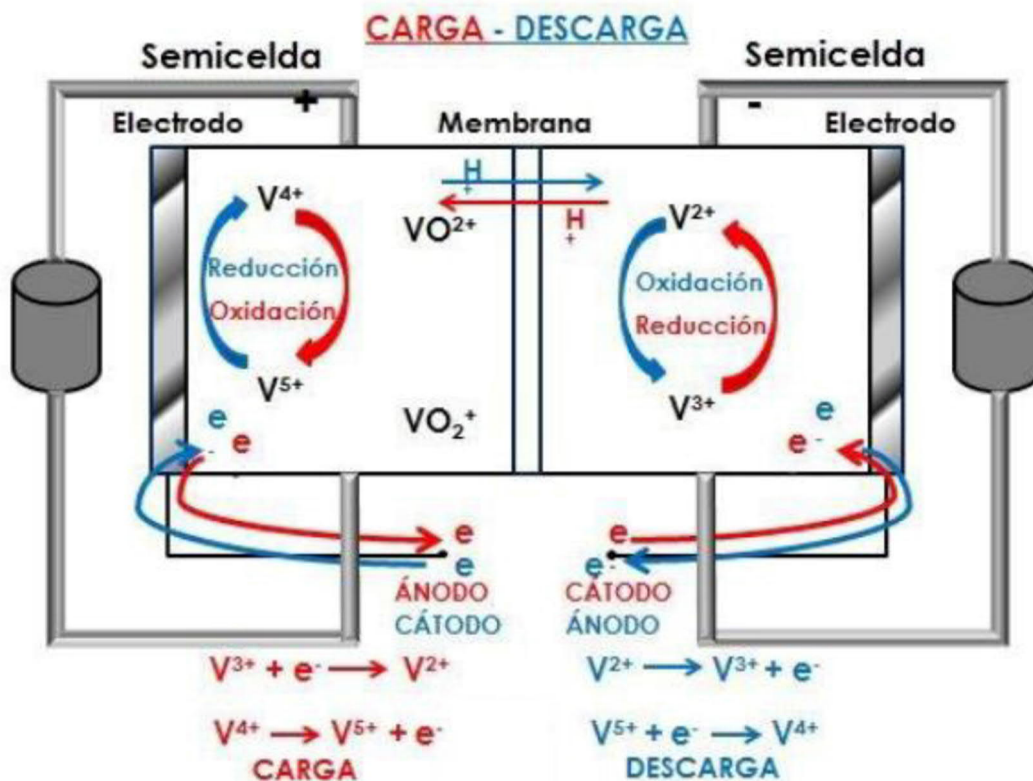


Figura 22- Funcionamiento de una batería redox vanadio [15] (Ana Barbón Núñez UNIVERSIDAD DE OVIEDO Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Página 74 de 118 Índice, n.d.)

Las ventajas de este tipo de batería son , una elevada vida útil, más de 10.000 ciclos completos, una eficiencia energética del 85%, aunque sigue siendo inferior a las baterías de litio, tienen una alta tasa de descarga, tiene unos tiempos de repuesta de carga/descarga rápidos, en cuestión de milisegundos pueden proporcionar altas potencias, puede proporcionar hasta dos veces la potencia nominal, durante cortos periodos de tiempo, al utilizar el mismo material activo para el cátodo y ánodo no hay riesgo de contaminación de alguno de los componentes activos, tiene la posibilidad de modular y escalar el diseño por la independencia de los módulos de energía y potencia características de las baterías de flujo, por el contrario, presenta los siguientes inconvenientes, la densidad de energía es baja dado que el vanadio tiene baja solubilidad en la corriente de electrolito ya que hay una concentración limitada de vanadio en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, debido a la densidad estos equipos se ven limitados en las aplicaciones de transporte, el alto coste del vanadio encarece este sistema, la membrana de intercambio iónico sufre degradación debido a la naturaleza altamente oxidante del V<sup>5+</sup>. [15] (Ana Barbón Núñez UNIVERSIDAD DE OVIEDO Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Página 2 de 118 Índice n.d.)



	<b>VRB</b>	<b>Zn/Br</b>
<b>Densidad de energía (Wh/kg)</b>	25	60 - 80
<b>Vida útil (años)</b>	10 - 20	5 - 10
<b>Ciclos de vida</b>	>10.000	>2.000
<b>Autodescarga</b>	Baja	Baja
<b>Eficiencia</b>	65 - 85	60 - 75
<b>Durabilidad de almacenamiento</b>	h - meses	h - meses
<b>Tiempo de respuesta</b>	ms	ms
<b>Madurez</b>	Validación del sistema en entorno real	Desarrollo

Tabla 10 - Características técnicas de las diferentes tecnologías de las baterías de flujo [15]

### 3. COMPARATIVA

Llegado a este punto veremos de una forma conjunta las características de cada uno de los sistemas de almacenamiento de energía que se han nombrado y explicado con anterioridad, con la intención de poder realizar una comparativa entre ellos y poder ver qué sistema se posiciona por delante de otro, que tecnología puede ser sustituida o para que aplicaciones son los más adecuados. En la tabla 7 se intenta plasmar numéricamente las características por las cuales serán comparados. En la figura se plasma de manera gráfica donde se sitúa cada una de las tecnologías de los diferentes sistemas de almacenamiento nombrados, se puede observar que los sistemas que otorgan la energía en un periodo inferior de tiempo son los supercondensadores y los SMES, son capaces de entregar la energía en cuestión de segundos, para rangos de potencias más bajas hasta 100 KW se utilizan los supercondensadores, para potencias más grandes los superconductores SMES. Si vamos subiendo en el tiempo de descarga vemos que la siguiente posición es el de los volantes de inercia, también tienen la capacidad de otorgar la potencia con una respuesta rápida entre segundos y minutos. y sus potencias pueden ir desde 1 KW hasta 10MW, con un tiempo superior a estos nos encontramos las diferentes baterías, y por último vemos los sistemas de aire comprimido y las centrales hidráulicas de bombeos, estas dos últimas tecnologías son las que pueden proporcionar más potencia, pero son las menos ágiles respecto a las respuestas en tiempo, para proporcionar todo su poder requieren tiempo para ir turbinando todo el agua o aire que tiene almacenado.

## Áreas de aplicación de cada tecnología

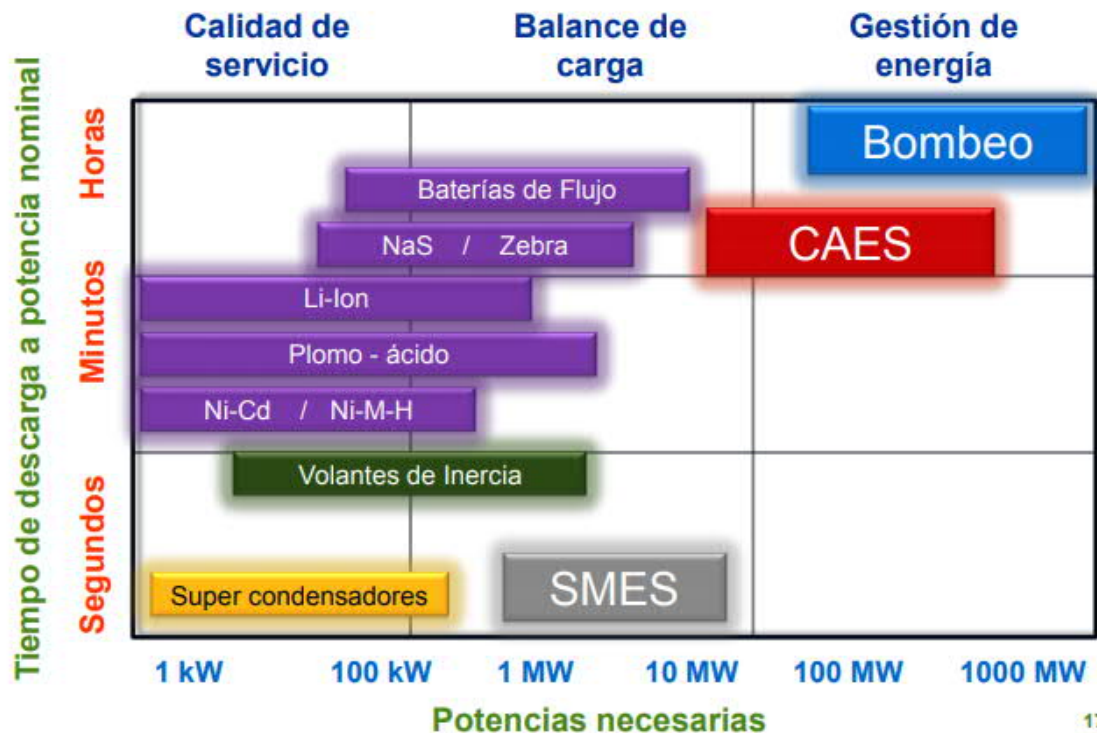


Gráfico 2.- Áreas de aplicación de cada tecnología. Fuente: [6]

Para poder realizar una buena comparativa en la siguiente tabla 7 vemos agrupados todos los principales datos de los diferentes sistemas de almacenamiento que hemos mencionado anteriormente, de esta manera podremos ver qué sistema o tecnología tiene más potencial o mayor peso para cada una de las características que hemos ido comentando,

Métrico		Hidro bombeado,	Aire comprimido	Volante	Plomo-ácido	Ion de litio	Níquel metal hidruro	Níquel cadmio	Azufre de sodio	Aire-zinc	Redox de vanadio	Bromo de zinc	Superconductora	Supercondensador	Calor de reacción
Energía específica	[Wh / Kg]	0,30–1,33	3,20–60	5–30	10–50	30–300	30–90	10–80	100–240	10–470	10–50	11,10–90	0,27–75	0,07–85,60	250
Densidad de energía	[KWh / m³]	0,50–1,33	0,40–20	0,3–400	25–90	94–500	38,90–300	15–150	150–345	22–1.673	10–33	5,17–70	0,20–13,80	1–35	300
Potencia específica	[W / Kg]	0,01–0,12	2,20–24	400–30.000	25–415	8–2.000	6,02–1.100	50–1.000	14,29–260	60–225	31,30–166	5,50–110	500–15.000	5,44–100.000	Desconocido
Densidad de potencia	[KW / m³]	0,01–0,12	0,04–10	40–2.000	10–400	56,80–800	7,80–588	37,66–141,05	1,33–50	10–208	2,50–33,42	2,58–8,50	300–4.000	15–4.500	Desconocido
Eficiencia	[%]	65–87	57–89	70–96	63–90	70–100	50–80	59–90	65–92	30 - 50	60–88	60–85	80–99	65–99	75,00–100,00
Esperanza de vida	[año]	20–80	20–40	15–20	3–20	2–20	2–15	2–20	5–20	0,17–30	2–20	5–20	20–30	5–20	Desconocido
Ciclo de vida	[ciclos]	10.000–60.000	8.000–30.000	10.000–100.000	100–2.000	250–10.000	300–3.000	300–10.000	1.000–4.500	1–500	800–16.000	800–5.000	10.000–100.000	10.000–1.000.000	Desconocido
Tasa de autodescarga	[%/día]	0.00	0.00	24–100	0,033–1,10	0,03–0,33	0,30–4	0,07–0,71	0–20	0,005–0,01			1–15	0,46–40	0,01–1
Escala	[MW]	10–8.000	0,01–3.000	0,001–10	0–50	0–3	0,01–3	0–50	0,01–80	0–1	0–20	0,001–20	0,01–200	0–5	0,01–1
Coste energético	[US \$ / KWh]	1–291,20	1–140	200–150.000	50–1.100	200–4.000	200–729	330–3.500	150–900	10–950	100–2.000	110–2.000	500–1.080,000	100–94.000	10,90–137
Coste de Potencia	[US \$ / KW]	300–5.288	400–2.250,	30,28–700	175–900	175–4.000	270–530	270–1.500	150–3.300	100–4.000	175–9.444	175–4.500	196–10.000	100–800	Desconocido
Solicitud		Gestión de energía a muy gran escala	Gestión de energía a muy gran escala	Calidad de potencia a mediana escala	Gestión de energía a pequeña / mediana escala	Gestión de energía a pequeña / mediana escala	Gestión de energía a pequeña escala	Gestión de energía a pequeña / mediana escala	Gestión de energía a mediana / gran escala	Gestión de energía a muy pequeña escala	Gestión de energía a mediana / gran escala	Gestión de energía a gran escala	Calidad de potencia a escala media / grande	Calidad de energía a pequeña / mediana escala	Gestión de energía a pequeña / mediana escala
Madurez técnica		Muy maduro / totalmente comercializado	Probado / Comercialización	Maduro / Comercializador	Muy maduro / totalmente comercializado	Maduro / Comercializado	Muy maduro / totalmente comercializado	Muy maduro / totalmente comercializado	Probado / Comercialización	Maduro / Comercializado	Probado / Comercialización	Probado / En desarrollo	Probado / Comercialización	Probado / Comercialización	Probado / En desarrollo
Impacto medioambiental		Medio	Medio-bajo	Muy bajo	Alto	Medio-alto	Medio-bajo	Alto	Medio-bajo	Muy bajo	Medio-bajo	Medio	Bajo	Muy bajo	Bajo / incierto
Apto para sistemas móviles		No	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	No	Sí	No	No	No	Sí	No

Tabla 11 .-Características de los diferentes sistemas de almacenamiento nombrados [25] (Sabihuddin, Kiprakis, and Mueller 2014)

Sobre la tabla anterior vemos demasiados datos, para realizar un análisis con un simple vistazo, para reducir datos podemos realizar un filtrado y eliminar todos aquellos sistemas que no son aptos para sistemas móviles, dado que nos encontramos en plena era de la movilidad y con un indiscutible auge del transporte eléctrico, como veremos en el siguiente capítulo las tendencias de las publicaciones de investigación van en este sentido.

También podemos realizar un filtro y eliminar aquellas que son muy contaminantes, cada vez como sociedad somos más conscientes de la importancia que tiene el medioambiente y todos aquellos materiales contaminantes acaban teniendo impuestos más costosos, que irán repercutiendo en el coste del producto y por ética moral no se debería utilizar materiales con alto impacto medioambiental, siempre y cuando existe un sustituto que pueda dar el mismo servicio.

Para facilitar el análisis a simple vista en la siguiente tabla 8 se han aplicado los filtros mencionados y se han coloreado en cada característica el sistema de almacenamiento que tiene mejor resultado en azul, el segundo mejor en verde fuerte y el tercero en verde flojo.

Características		Aire comprimido	Volante	Ion de litio	Níquel hidruro metal	Aire -zinc	Supercondensador
Energía específica	[Wh / Kg]	3,20–60	5–30	30–300	30-90	10–470	0,07–85,60
Densidad de energía	[KWh / m <sup>3</sup> ]	0,40–20	0,25–400	94–500	38,90-300	22–1.673	1–35
Potencia específica	[W / Kg]	2,20–24	400–30.000	8–2.000	6,02-1.100	60–225	5,44–100.000
Densidad de potencia	[KW / m <sup>3</sup> ]	0,04–10	40–2.000	56,80–800	7,80-588	10–208	15–4.500
Eficiencia	[%]	57–89	70–96	70–100	50-80	30 - 50	65–99
Esperanza de vida	[año]	20–40	15–20	2–20	2-15	0,17–30	5–20
Ciclo de vida	[ciclos]	8.000–30.000	10.000–100.000	250–10.000	300-3.000	1–500	10.000–1.000.000
Tasa de autodescarga	[%/día]	0.00	24–100	0,03–0,33	0,3-4	0,005–0,01	0,46–40
Escala	[MW]	0,01–3.000	0,001–10	0–3	0,01-3	0–1	0–5
Coste energético	[US \$ / KWh]	1–140	200–150.000	200–4.000	200-729	10–950	100–94.000
Coste de potencia	[US \$ / KW]	400–2.250,	30,28–700	175–4.000	270-530	100–4.000	100–800
Solicitud		Gestión de energía a muy gran escala	Calidad de potencia a mediana escala	Gestión de energía a pequeña escala	Gestión de energía a pequeña escala	Gestión de energía a muy pequeña escala	Calidad de energía a pequeña / mediana escala
Madurez técnica		Probado / Comercialización	Maduro / Comercialización	Maduro / Comercialización	Muy maduro / totalmente comercializado	Maduro / Comercialización	Probado / Comercialización
Impacto medioambiental		Medio-bajo	Muy bajo	Medio-alto	Medio-bajo	Muy bajo	Muy bajo

Tabla 12- Características de los sistemas de almacenamiento aptos para aplicaciones móviles y con bajo impacto ambiental [25] (Sabihuddin, Kiprakis, and Mueller 2014)

Observando la tabla vemos el potencial de el almacenaje con el aire acondicionado, destacando en la esperanza de vida, su baja tasa de autodescarga, su capacidad de abarcar un rango amplio de almacenamiento dependiendo del tamaño del depósito de aire comprimido y su bajo coste, en estas cuatro características se posiciona por delante del resto de los sistemas de almacenamiento.

Los volantes de inercia son la mejor opción en cuanto a precio por potencia del resto de los sistemas. Pero por si solos no son competencia con sistemas como las baterías, debido a su tasa de autodescarga

Las baterías de Ion de litio destacan sobre el resto por su alta eficiencia. Sin dejar de lado su alta densidad de energía.

Las baterías de aire de zinc destacan sobre el resto por su energía específica y su densidad de energía.

Las baterías de Sodio de Azufre a no aparecer en esta tabla a pesar de su buena densidad y posibilidades tienen un fuerte inconveniente, requieren una fuente externa de calor para llegar a la temperatura optima de funcionamiento.

Las baterías de níquel e hidruro metálico cada vez van cogiendo más cota de mercado en detrimento del las de níquel cadmio, gracias a la mejora del autodescarga y su poco impacto ambiental.

Los supercondensadores destacan por su potencia específica, por su densidad de potencia y su larga vida.

Para realizar una comparativa puramente económica extraemos los datos de costes de la tabla 7, e incorporamos los cálculos de la media y la mediana de estos costes, extrayendo los datos del artículo [25]. Sobre los valores de la media y la mediana se realiza un orden jerárquico asignando el valor de 1 al más caro e incrementando una unidad en el siguiente valor por orden jerárquico. Para poder valorar de una manera única tanto el coste en termino de potencia como en energía, se ha sumado el ranking de la media y la mediana en estos dos términos y se obtienen los datos de la tabla 9

Sistema almacenamiento	Coste energético [US \$ / KWh]				Coste de Potencia [US \$ / KW]				Ranking				SUMA
	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Media energía	Mediana energía	Media potencia	Mediana potencia	
<b>Aire comprimido</b>	1	140	35,67	11,88	400	2.250	500	500	15	14	10	9	48
<b>Plomo-ácido</b>	50	1.100	303	250	175	900	383	300	11	7	11	11	40
<b>Hydro bombeado.</b>	1	291,2	57,94	33	300	5.288	1000	1000	14	13	7	6	40
<b>Supercondensador</b>	100	94.000	19.866	9,75	100	800	321	300	2	15	13	11	41
<b>Níquel metal hidruro</b>	200	729	451	407	270	530	362	286	7	5	12	14	38
<b>Aire de zinc</b>	10	950	313	130	100	4.000	1.533	975	10	11	6	7	34
<b>Volante</b>	200	150.000	12.454	900	30,28	700	290	290	3	2	14	13	32
<b>Bromo de zinc</b>	110	2.000	447	225	175	4.500	1.788	1300	8	8	4	5	25
<b>Cloruro de níquel de sodio</b>	100	345	211	200	150	10	3.613	2150	12	9	1	1	23
<b>Níquel cadmio</b>	330	3.500	1.132	800	270	1.500	867	600	4	3	9	8	24
<b>Azufre de sodio</b>	150	900	387	350	150	3.300	1.736	1850	9	6	5	3	23
<b>Redox de vanadio</b>	100	2.000	488,1	200	175	9.444	2.461	1545	6	9	2	4	21
<b>Calor de reacción</b>	10.90	137	73,74	73,74	?	?	?	?	13	12	?	?	25
<b>Superconductora</b>	500	1.080.000	125.488	2.755	196	10.000	981,56	325	1	1	8	10	20
<b>Ion de litio</b>	200	4.000	1110	600	175	4.000	2.325	1950	5	4	3	2	14

Tabla 13- Tabla 13.-Costes de los sistemas de almacenamiento [25] (Sabihuddin, Kiprakis, and Mueller 2014)



Sobre la tabla 9 se ha resaltado en verde los sistemas que anteriormente se habían contemplado como posibles para aplicaciones móviles y se han ordenado de más económico a más caro. Analizando los valores de la tabla 9, se observa que los sistemas de almacenamiento más económico, el primero que nos encontramos que se puede aplicar a temas de movilidad el de aire comprimido, este no es un sistema más económico, pero hay que tener en cuenta que este sistema nos es apto para todos los equipos portables, es un sistema que se puede aplicar en vehículos como coches, locomotoras, etc. Cuando intentamos aplicación este sistema a equipos electrónicos o de consumo eléctrico se incrementan los costes y se reduce el rendimiento. Si continuamos bajando el siguiente sistema que nos encontramos en términos de costes es el supercondensador, como ya hemos comentado antes, este es un sistema muy interesante por su capacidad a dar altas potencias y tener un tiempo de reacción muy rápido, teniendo como pega su densidad de energía. El siguiente sistema en el ranking de los económicos y con posibles aplicaciones en movilidad o equipos portátiles son las baterías de aire- zinc, estas disponen de una alta densidad de energía, pero baja potencia y todavía no se ha logrado un sistema recargable con rendimientos equiparables a otros sistemas competidores en características, pero del punto de vista económico y de densidad de energía es un sistema a tener muy en cuenta. El siguiente en la lista son los volantes de inercia, este sistema de almacenamiento si lo vamos a utilizar para suministro eléctrico de equipos de escala hasta 5 MW, sería mejor utilizar los supercondensadores, ahora bien, estos equipos pueden tener otra aplicación cuando se trata de almacenar la energía directamente procedente de un momento angular o bien en suministrar la energía directamente en movimiento sin necesidad de transformarla en electricidad. En los últimos puestos, las de ion de litio, a pesar de ser las más caras son las que tienen una densidad de energía más alta por lo que el interés de estas no es tanto económico como por sus características técnicas.

Con los datos expuestos se intenta plasmar las utilidades o posibles aplicaciones de cada sistema de almacenamiento, siendo difícil generalizar en algún caso, se ha intentado aplicar un criterio que contempla la mayoría de los casos de aplicación y lógicamente no se ha podido detallar cada aplicación concreta, si no que se ha intentado agrupar un poco por familias. Partiendo de los datos de densidad de energía, densidad de potencia y las capacidades de almacenamiento de cada sistema se ha obtenido la tabla 10. Donde se ha intentado plasmar si el sistema de almacenamiento se considera óptimo para las aplicaciones, agrupamos las aplicaciones como de auto abastecimiento segregando en dos rangos de consumo, inferior y superior a 80KWh, las aplicaciones para mejorar la calidad de red o para mejorar la gestión de esta e ayudar a integrar las renovables, este grupo se ha distinguido según su facilidad geográfica, puesto que no es lo mismo en medio de una ciudad que en un desierto o en plena montaña. Luego entramos en las aplicaciones de electrónica de consumo, como pueden ser cámaras, teléfonos ordenadores... También se contempla un mercado que esta muy en auge que es el de las herramientas a batería y por ultimo los principales equipos de movilidad, distinguiendo patinete, bici, moto y coche asignándoles unos Km de referencia.

SISTEMA DE ALMACENAMIENTO	Auto abastecimiento		Calidad de red		Electrónica portátil		Movilidad eléctrica			
	Vivienda única < 80KWh	Industria > 80KWh	Facilidad geográfica	Sin facilidad geográfica	Herramientas con motor	Electrónica de consumo	Patinete 12km	Bici 40km	Moto 600km	coche 200km
Hidro bombeado.	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Aire comprimido	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Volante	NO	NO	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Plomo-ácido	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Ion de litio	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Níquel hidruro metálico	SI	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO
Níquel cadmio	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Azufre de sodio	NO	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Aire de zinc	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO
Redox de vanadio	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Bromo de zinc	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Superconductores	NO	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Supercondensador	NO	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI
Térmica	NO	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO

Tabla 14.-posibilidad de aplicación de los sistemas de almacenamiento.

Observando la tabla 10 vemos que gracias a sus características las baterías de ion de litio son las mas polivalentes se pueden comercializar para todas las aplicaciones, a pesar de ser las más caras, son muy útiles por su alta densidad de energía, lo que las convierte en las mas adecuadas en equipos o aplicaciones de movilidad y en todas las que el peso adquiere un papel importante, como puede ser una instalación en un lugar remoto donde el coste de transporte adquiere un papel relevante.

Otro aspecto para resaltar de lo que vemos en la tabla 10 es la posibilidad de las baterías de flujo en sistema estáticos, gracias a su escalabilidad se prevé una aceptación para sistemas estáticos a pesar de su baja densidad de energía.

En la tabla 10 resalta que no se le ha asignado o dado ninguna aplicación a las baterías de níquel cadmio, esto es dado a que estas baterías se consideran contaminantes y su aplicación en la que encajarían perfectamente serían en aquellas que trabajarían en régimen de flotación, es decir carga constante y consumo constante.

La de plomo acido les pasa parecido a las baterías de níquel cadmio están muy extendidas en sistemas de ignición y se consideran con alto impacto ambiental, por lo que se pueden buscar sustitutos con menos impacto, aunque esto se vea repercutido en el coste de estas.

Los sistemas basados con superconductores magnéticos y los supercondensadores son ideales para suplir los micro cortes de la red, gracias a su alta densidad de potencia. Los supercondensadores también pueden tener aplicaciones en equipos portables de movilidad, sobre todo con los de baja autonomía y con los que requieren de más autonomía apoyado por sistemas como baterías de litio.

### 3.2.- ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE PUBLICACIONES

Realizando unas búsquedas en Web Of Science por cada uno de los sistemas de almacenaje de energía mencionados en capítulos se observa una gran diferencia en el número de publicaciones de baterías con respecto al resto de sistema, sobre todo

vemos que en los últimos 15 años hay un incremento en publicaciones de artículos de investigación sobre las baterías con respecto al resto de sistemas, viene seguido por los Supercondensadores, Tal y como se observa en la figura.

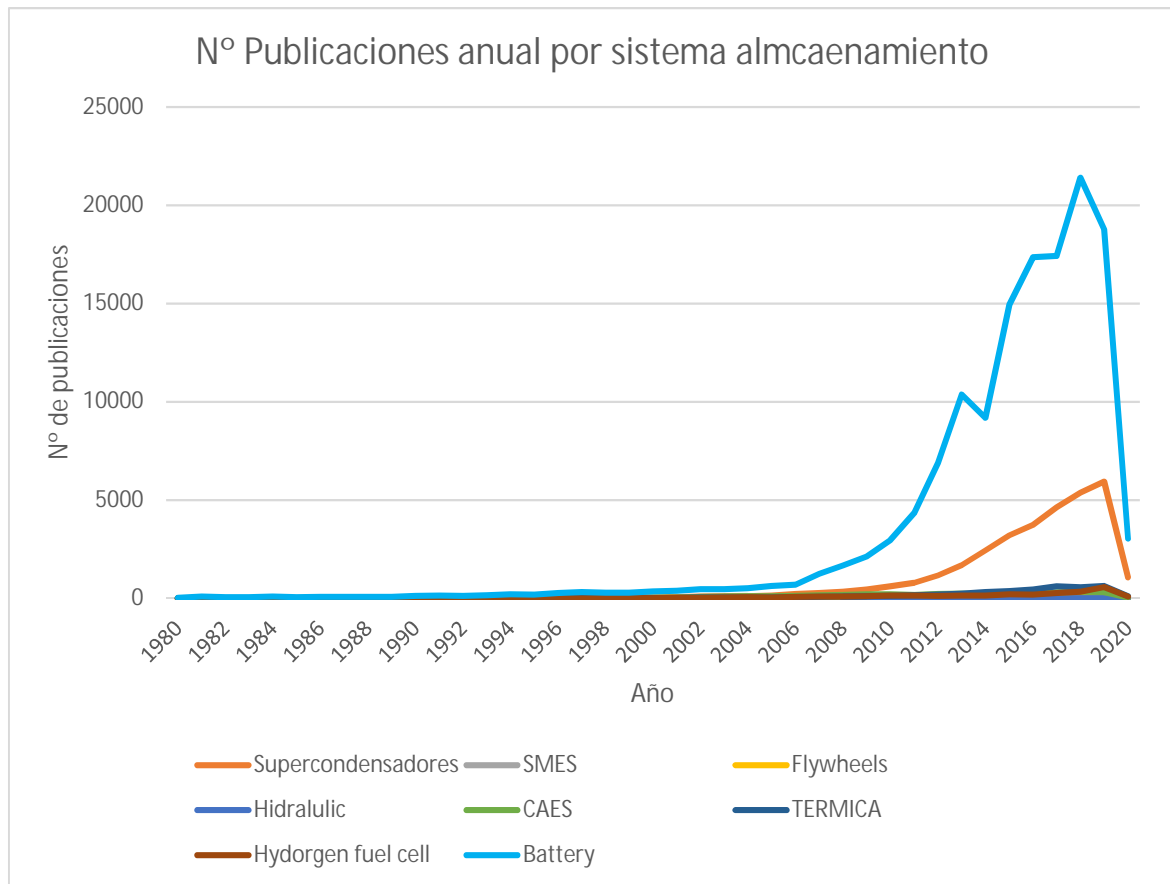


Gráfico 3.- Publicaciones anuales por sistema de almacenamiento de energía

Como el campo de las baterías es muy amplio y engloba diferentes tipos de baterías y son muy diferentes entre ellas, se realiza el mismo ejercicio sobre las tasas de publicación de artículos de cada una de las variedades de baterías que hemos mencionado anteriormente y obtenemos el gráfico.

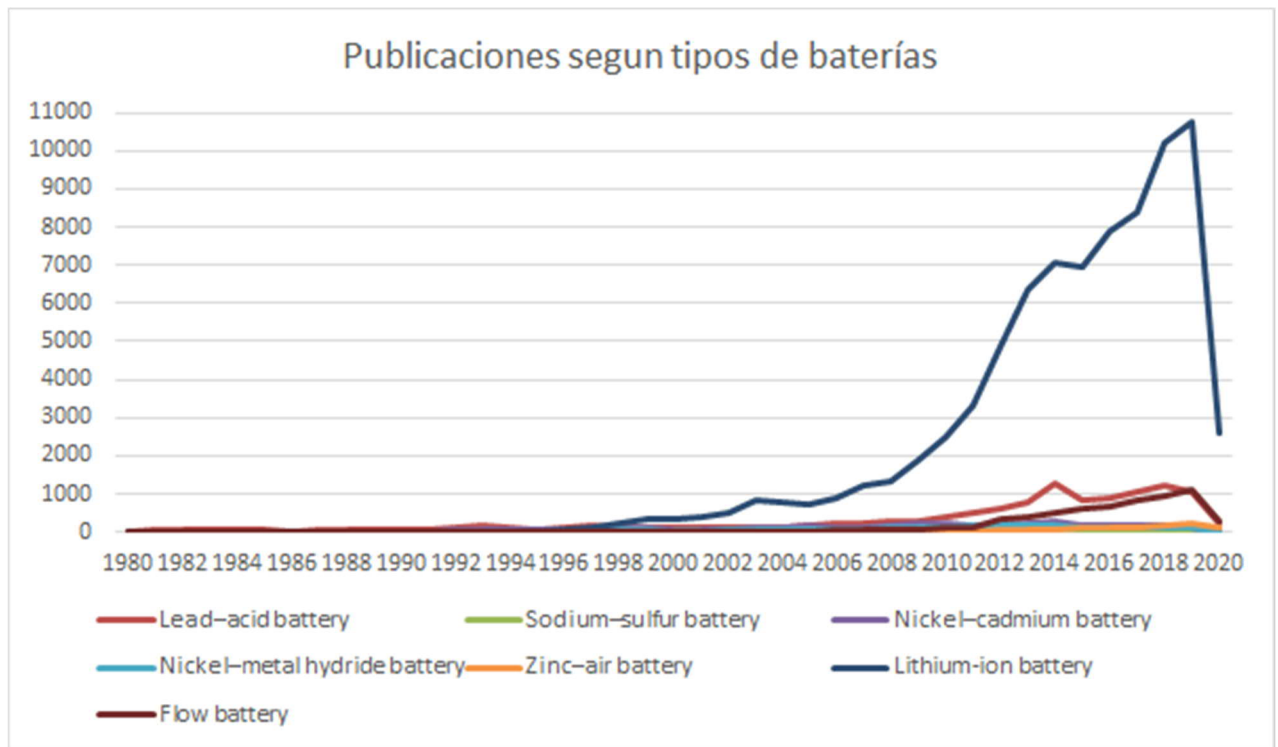


Gráfico 4.- Publicaciones anuales por tipología de baterías

Según se puede observar en el gráfico las investigaciones en los últimos años se han centrado en las baterías de litio. Si nos fijamos en este sistema de almacenamiento en función de los datos de la tabla 8 vemos que esta entre los tres mejores sistemas de almacenamiento en casi todas las características destacando más en la eficiencia y seguido por la energía específica y la densidad de energía, aspectos muy importantes para la movilidad.

## 4 – ANALISIS DETALLADO BATERÍAS ION-LITIO

Si repetimos el ejercicio anterior para analizar las publicaciones de cada tipo concreto de baterías de litio mencionadas con anterioridad, obtenemos el siguiente grafico

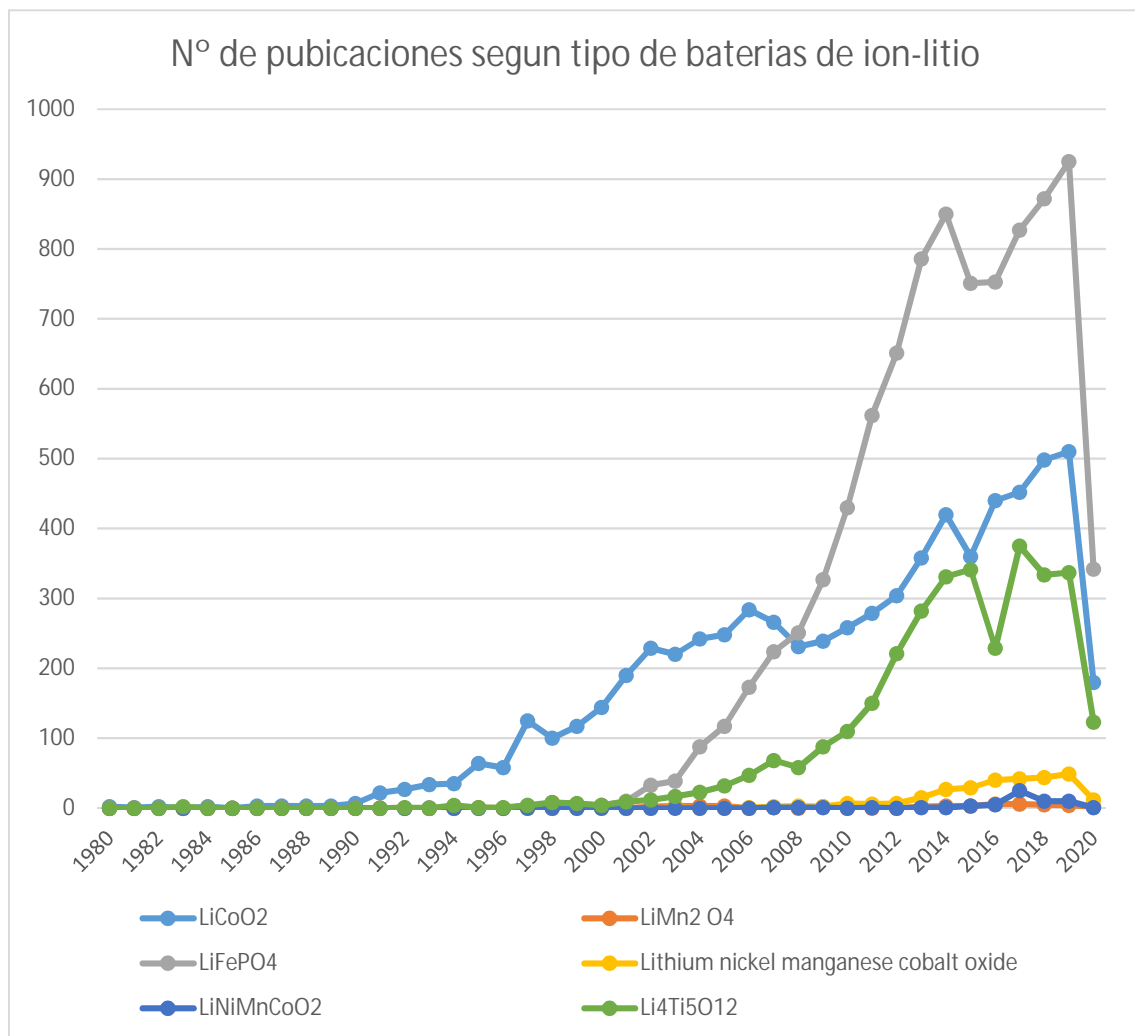


Gráfico 5.- Publicaciones anuales por tipología de baterías de ion de litio

Como se puede observar en la gráfica el sistema con mayor tendencia al alza en los últimos años es el fosfato Hierro-litio, este incremento de publicaciones puede ser debido a que AK Padhi descubrió que de todos los fosfatos metálicos analizados el

LFP era el único que podía extraer e insertar reversiblemente iones de litio. LFP es significativamente más barato que los cátodos basados en cobalto y posee una capacidad similar a estos, esto lo puede convertir en un candidato prometedor para los vehículos eléctricos.[26](M. Li et al. 2018)

La siguiente tecnología, en número de publicaciones, es la de óxido de cobalto-litio, esta es una de las tecnologías más maduras dentro de las baterías de ion de litio, se puede observar en el gráfico que es la primera tecnología que empieza a despuntar en publicaciones de investigación a partir del 1990 ya se empieza a distanciar del resto. Casi todas las investigaciones buscan el disminuir el peso y el tamaño, aumentar su durabilidad de ciclos y mantener o aumentar la seguridad mientras que se abaratan costes.

La tercera batería, en número de publicación por año, es la de óxido de titanio-litio  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ . Esta es la única tecnología de ánodos que ha tenido éxito en el mercado, gracias a su intercalación increíblemente reversible junto con su potencial relativamente alto que lo convierte en un material muy robusto

Los primeros trabajos publicados sobre las baterías de litio se centraron en la física del estado sólido, al final del siglo XX con el aumento de la nanotecnología las investigaciones se centraron en aspectos más morfológicos de los materiales de los electrodos. Las investigaciones se pueden clasificar en las que se centran en las indagaciones sobre cátodos y la que se centran en la búsqueda de ánodos. Los primeros cátodos que se asemejaban a los actuales formados por estructuras cristalinas en capas dicalcogenuros, metálicos o casi metálicos como  $\text{TiS}_2$ , formado por una estructura de capas ordenadas con hojas alternadas de Ti y S, luego se convino este cátodo con un ánodo de Li o Li-Al formado el sistema Li/TiS que se comercializo a finales de los 1970, aunque solo en formatos de pila de botón para relojes, los problemas de este sistema eran los siguientes, a pesar de su cátodo TiS tenía alta capacidad de intercalación de iones y una alta durabilidad de ciclo, tenían un voltaje bajo, se fabrica en estado cargado, lo que significa que requiere una fuente de litio en el ánodo, sin descuidar la problemática del manejo del TiS en condiciones ambientales por su liberación de tóxicos al entrar en contacto con la humedad, este sistema utiliza un electrolito de  $\text{LiClO}_4$  que es peligroso por su sensibilidad a los golpes a esto se le añade la inseguridad del ánodo de metal de Li, esta problemática de la seguridad de los estos ánodos se vio a finales del 1982, Moli Energy Ltd tuvo que retirar sus baterías de Li/MoS<sub>2</sub> usadas en teléfonos móviles por informes sobre sus incendio, esto desalentó el uso comercial de los ánodos de litio metálico y con ello los sistemas de Li/TiS<sub>2</sub> y Li/MoS<sub>2</sub>. En la misma década de los 1980 a los inicios, se publica un artículo por Godshall de cátodo de óxido metálico de alto voltaje  $\text{LiCoO}_2$  (LCO), este fue operado a alta temperatura 400-450°C y unos meses después, Mizushima informo de un cátodo LCO a temperaturas ambiente que utilizaba electrolitos organicos, tenía una estructura en capas similar a las del  $\text{TiS}_2$ , pero sin los inconvenientes de los toxicos con la humedad y con un mayor voltaje de inserción de los iones de litio, pero el alto voltaje que requería, causaría la oxidación del electrolito orgánico y la inestabilidad del material del cátodo, se descubrió que una deslitiación completa afectaba al 5% de su capacidad en cada ciclo, con lo que la capacidad practica de iones de litio que pueden extraer e insertarse de manera reversible en el LCo es aproximadamente la mitad del teórico, que ya era suficiente para ese momento. El verdadero éxito del LCO fue el hecho que se fabricase en su estado litiado y esto proporciona más libertad en el material del ánodo. [26](M. Li et al. 2018)

Por otro lado, la búsqueda de un ánodo fue más problemática que para el cátodo, condujo a muchos abandonos que nunca llegaron al mercado, como el caso de los ánodos Si-Li y Sn-Li que sufrían un cambio de volumen tras la litiación y la posterior

desintegración del electrodo. El ánodo LiAl fue bastante alentador en comparación con otros de aleación proporcionando más del 90% de eficiencia coulombica pero solo para bajas capacidades y baja densidad de corriente. En la década de los 1980 se publicaron trabajos sobre ánodos basados en dióxido de tungsteno y lo combinaron a base TiS, aunque las reacciones de extracción e inserción del WO<sub>2</sub> fueron altamente reversibles requería que previamente se litiara, el TiS<sub>2</sub>/WPO<sub>2</sub> también presentaba el problema de un alto voltaje en el ánodo y una baja capacidad. De todas las investigaciones sobre el ánodo, el de base de carbono se consideró el más prometedor gracias a la alta reversibilidad de las reacciones de litación/delitiación, la alta capacidad del carbono (372 mAh/g) y un potencial de litación bajo, a mediados de los 70 se informó del primer uso de un ánodo de grafito basado en la intercalación, donde varios iones alcalinos como Li, K, Na, Rb y Cs se intercalaron en el grafito, a raíz de esto surgieron informes que identificaban el efecto bloqueo, que se formaba de la descomposición del electrolito orgánico en la superficie del grafito tras la litación, fue cuando apareció el nuevo concepto de interfase de electrolito sólido (SEI). A posterior en el 1981 se presenta una celda de sal fundida de alta temperatura entre 350 y 500°C que se realiza con un ánodo de grafito LiC<sub>6</sub> y un cátodo de sulfuro metálico, sin electrolito orgánico. Dos años después en 1983 se presenta la patente sobre una batería secundaria a temperatura ambiente, esta utiliza un ánodo LiC y un cátodo NbSe<sub>3</sub> solvente de dióxolano (DOL) con electrolito de sal LiAsF<sub>6</sub>. En ese mismo año se publicó un trabajo con una celda de ánodo de grafito a 60° de temperatura de funcionamiento con electrolito sólido y demostró su reversibilidad. En el 1987 Yoshino se decanato por el carbón de coque, un tipo de carbón blando que demostró ser altamente reversible y con una excelente capacidad de retención, y lo combinó con un cátodo LCO en un carbonato de propileno (PC) mezclada con un electrolito basado en carbonato de dietilo y de esta manera patente lo que ahora conocemos como las baterías de ion de litio LIB. En el 1992 se comercializan las LIB para electrónica de consumo de 80 Wh/Kg con una muy buena aceptación en el mercado. [26](M. Li et al. 2018).

Tras la comercialización de las LIB se fue consiguiendo un incremento de su rendimiento, en la mayoría de las mejoras, el cátodo se quedó sin cambios y de realizaron modificaciones en el ánodo y el electrolito para alcanzar densidades de energía más altas, mayor velocidad de carga y descarga y alargar su vida útil. Las investigaciones del ánodo condujeron a tres materiales, el grafito, el carbono que contiene hidrógeno y el carbono puro, debido a esto y a las siguientes investigaciones las segundas generaciones de LIB utilizaron en los ánodos carbonos duros producidos a partir de polímeros altamente reticulados, con esto se incrementó un 10% su densidad de energía. Los cambios que se realizaron en el electrolito fue la sustitución del disolvente del electrolito de carbonato de propileno (PC) con carbonato de etileno (EC) este ajuste conseguía una capa SEI más estable, debido a que el EC tenía un alto punto de fusión de 39°C era necesario el mezclarlo con otro disolvente que lo hiciera permanecer en estado líquido a temperatura ambiente y con una viscosidad razonable. En los 1990 se propuso usar una mezcla al 50:50 de EC y PC, gracias a la introducción de este electrolito fue una de las primeras razones que permitieron la reintroducción del grafito en las LIB comerciales, aproximadamente en el 1995 la mayoría de las baterías de litio ya se habían desplazado hacia el ánodo de grafito, en el 2010 la cuota de mercado del carbón duro había desaparecido por completo [26](M. Li et al. 2018).

## 5 – TECNOLOGIAS FUTURAS

Con el auge de la movilidad y la necesidad del vehículo eléctrico en nuestra sociedad, las tendencias en la búsqueda de una batería se han centrado mucho en la movilidad y



en la electrónica portable, pero ahora entramos en la tesitura que, si el vehículo eléctrico, el cual lo estamos considerando de cero emisiones se nutre de energía generada a base de carbón o combustibles fósiles, se podría considerar que tienen las mismas emisiones que un vehículo de combustión o incluso más. Por esta razón hay teorías que indican que habrá una tendencia importante en un futuro próximo en investigaciones para mejorar baterías para aplicaciones en sistemas de almacenamiento de energía a nivel de red (GESS) para implementar al sistema eléctrico más energías renovables y poder amortiguar las fluctuaciones de aerogeneradores o placas solares. Estas baterías seguirían compartiendo características con las que se buscan para los vehículos eléctricos, pero perderían importancia la seguridad y la densidad de energía, que son prioritarios en un elemento móvil. En concreto los avances en las baterías de Na podrían ser un serio competidor para los sistemas de almacenamiento a nivel red

Otro aspecto a tener muy en cuenta en las baterías futuras es el medio ambiente, dado que las baterías se consideran una tecnología verde, alguno de sus componentes no lo son, el Co y el Ni son tóxicos y la sal de LiPF<sub>6</sub> que comúnmente se utiliza como electrolito en contacto con el aire forma fluoruro de hidrógeno HF que es un gas corrosivo, así que seguramente las investigaciones futuras tengan una inquietud por ir eliminando estos componentes perjudiciales para el medio ambiente por otros que no lo sean. Dada la escasez de Li los investigadores han empezado a centrarse en Na, K, Mg, Ca y Al. [26](M. Li et al. 2018).

Una de las tecnologías que más se menciona y sobre la que se están realizando muchas investigaciones es la batería de azufre de litio, Li-S, muchas investigaciones se basan en la nanotecnología, cosa que por el momento lo distancia un poco de la comercialización. Recientemente se han publicado noticias sobre este tipo de baterías, por ejemplo, la empresa Boicheng New Energy Co.,LTD, en abril de 2020 publicaba la noticia que ha desarrollado una batería de litio-azufre, estiman que con esta batería un vehículo eléctrico es capaz de realizar 2000 km y puede ser cargada de forma rápida en 30 minutos, manteniendo una capacidad de un 74% después de 1000 ciclos de carga y descarga rápida con una tasa de 5C, le otorgan una vida de más de 2 millones de kilómetros. Según comentan utilizan silicio y carbono para lograr una estructura porosa estable para el cátodo, añadiendo oligoelementos a la estructura del cátodo y al electrolito retasan la generación de polisulfuros, han reconstruido la formulación del separador y estudiando la aleación de litio del ánodo han conseguido suprimir el crecimiento de dendritas de litio y la formación de litio en polvo, según sus publicaciones ya tiene dominados los procesos de fabricación de los cátodos los ánodos y los separadores. Prevén que para finales de 2020 estén preparados para su producción, con una capacidad de 1000Wh/Kg y barajan un coste inferior a los 100\$ el KW estando por debajo del resto de baterías que serían susceptibles de ser utilizadas para vehículos móviles. Ciertamente es que esta no es la primera noticia de este tipo, ya hemos visto varias que hablaban de baterías super potentes y con fechas de entrar al mercado con las que ya tendríamos que disponer de ellas.

Parce que esta noticia va acorde con las publicaciones científicas sobre cómo se debe encarar la evolución de estos equipos para que sea viable su comercialización, los cuales indican la importancia de la ingeniería celular, debido a la sensibilidad de este sistema a los cambios leves en cualquier de los parámetros de la célula, la composición del electrolito no solo influye en el rendimiento, sino en que también en el voltaje y el funcionamiento de la celda, viéndose afectada por la cantidad de electrolito y su concentración en sal así como el uso de aditivos electrolíticos, estas modificaciones se realizan con la intención de abordar el mayor problema de estos equipos, el transbordador de polisulfuros. Hasta ahora la única manera de evitar estos efectos era mediante la eliminación del electrolito líquido y realizar la separación del cátodo y el ánodo mediante electrolito en estado sólido, esto tiene los inconvenientes de incrementar su fragilidad y a menudo su incompatibilidad con el litio metálico. Por lo

tanto, se requiere diseño de electrodos con alto contenido en azufre y una alta carga de área y los cátodos y otras partes celulares adecuadamente diseñados pueden lograr resultados extraordinarios. [27]

Otra tecnología de la cual se habla como el futuro es el grafeno, ya hay varias empresas que están ofreciendo baterías con tecnologías basadas en el grafeno, por ejemplo, SAMSUNG ha elaborado una batería que dispone de los electrodos recubiertos de grafeno. Las ventajas de este material hacen que sea una tecnología prometedora para aplicaciones en baterías y en supercondensadores, pero no hay que olvidar que es un material nuevo, no hay establecida una producción que pueda abastecer a la industria de las baterías de forma estable por el momento y los costes de producción del grafeno es todavía muy alto. Las supuestas mejoras de la introducción del grafeno pasan por incrementar los ciclos de vida, mejorar la tasa de carga y descarga haciendo el equipo mucho más fuerte frente a carga o descargas rápidas y mejora el comportamiento a temperaturas relativamente altas.

Dado la importancia que está adquiriendo los elementos portables, así como el coche eléctrico y el coste de este debido al coste de las baterías el grafeno puede ser una opción futura. El grafeno con grandes áreas y alta calidad puede servir como transportador para aplicaciones de baterías, en este sentido las baterías de grafeno pueden proporcionar mayor densidad de energía y mayor potencia, siendo ventajosa tanto para vehículos eléctricos como para aplicaciones de gran capacidad ayudando a la integración de las energías renovables en el sistema eléctrico.

Mirando la tabla de las comparativas Combinación de batería de litio con supercondensadores. Gracias a sus características complementarias los sistemas híbridos tienen un alto atractivo, ya se barajan diversas publicaciones indicando que hay empresas como Volkswagen o Nawa Technologies están trabajando en supercondensadores que sean apropiados para combinarlos con las baterías de litio para vehículos eléctricos. Esto pretende reducir el peso, reducir el coste e incrementar la vida. Con estos sistemas se puede recuperar mucha más energía en la frenada regenerativa. Eliminará estrés de la batería en las descargas y cargas rápidas Esta combinación de sistemas ya se están utilizando en sistemas de almacenamiento de energías renovables, donde el volumen no es tan importante como en vehículos eléctricos, esta combinación da muy buenos resultados aportando estabilidad a las baterías cuando arrancan motores y se requieren picos de cargas considerables.

## 6 – CONCLUSIONES

Es muy difícil o por el momento casi imposible que una tecnología elimine a otra dado que cada una tiene su punto fuerte, cada uno de los sistemas de almacenamiento tiene su punto fuerte y su aplicación dependiendo de sus características, aquel que no es apto para aplicaciones que requieran movilidad, puede ser apto para almacenaje de energía en sistemas estáticos como pueden ser generación de energía para casa, o simplemente para aprovechar la discriminación horaria de la tarificación eléctrica, es difícil predecir hacia donde se va dirigir el sistema de almacenaje de energía, dado que puede que emerja una tecnología que pueda retirar a muchas que conocemos, por el momento hay una cosa que es importante de analizar, hay que partir de la premisa de si es un sistema móvil o estático, en el caso que sea estático hay un aspecto muy

importante que es la situación geográfica, hay lugares en los que es muy propensos a utilizar una tecnología basada en un sistema basado hidráulica de bombeo, actualmente estos sistemas se están instalando en zonas cercanas al mar y con baja densidad de población y acompañado de una desaladora que proporcione agua y donde hayan superficies a diferente altura susceptible de ser inundada, otro aspecto a tener en el momento de decidir qué tecnología usar para un sistema de almacenamiento un aspecto clave es ver qué capacidad necesitamos o previsión de energía pretendemos almacenar, a partir de aquí podemos ver que sistemas la siguiente elección sería ver la situación geográfica para poder tomar una decisión, se podría utilizar el sistema de aire comprimido, hidráulica, baterías u otro sistema dependiendo la necesidades de cada caso. Para sistemas que se requiere una escala grande de energía habría que valorar la hidráulica, el aire comprimido, baterías de flujo o volantes de inercia.

Para la elección de sistemas almacenamiento para sistemas móviles se complican las elecciones, pero en este caso hay que priorizar la energía específica y la densidad de energía, pero hay un aspecto que considero muy interesante que es la combinación de un sistema de supercondensadores con un sistema de baterías, de esta manera el supercondensador podría aportar energía en los picos de potencia rápidos, aquellos que deterioran la vida de la batería por ejemplo en un vehículo eléctrico el sistema de supercondensadores podría aportar el suministro de energía para las aceleraciones bruscas o en el inicio de la marcha y la batería para el suministro a velocidades más estables. Si nos remontamos a la tabla 8 y sobreponemos las características fuertes de los supercondensadores en las baterías de Ion de litio, azufre de sodio o aire-zinc vemos como conseguimos un conjunto que destaca en casi todas las características, ahora bien, no todo son ventajas, al sumarle un elemento el conjunto vería un detrimento en la energía específica y en la densidad de energía, aspectos muy relevantes cuando nos referimos a elementos móviles o portables, pero sin embargo en términos de potencia de específica y densidad de potencia tendríamos una ventaja respecto la baterías en individual. Concretamente si visualizamos la superposición de las características más destacadas de los supercondensadores y las baterías de aire-zinc, este conjunto resalta en todas las características. Sería muy importante dimensionar bien este conjunto para no penalizar la densidad de energía y la energía específica y lógicamente este conjunto debe ir acompañado de un controlador externo.

## **7 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

### **7.1.- PUBLICACIONES**

[1] Laura Rodríguez Ávila. (2014) EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA CAES COMO SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EÓLICA. CASO DE ESTUDIO EN ESPAÑA.

[2] Oliver, A., González, F. J. N., & Santos, A. G. (2012). Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica. *Materiales de construcción*, (305), 131-140.

- [3] Mera, I. G. (2010). CAPÍTULO 2. BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES. su:” Diseño de un sistema de almacenamiento de energía híbrido basado en baterías y supercondensadores para su integración en microrredes eléctricas”. Proyecto fin de carrera, Universidad de Sevilla, España.
- [4] Guerrero, M. A., Romero, E., Milanés, M., Miñambres, V., & González, E. (2009). Aplicación de sistemas de almacenamiento de energía con supercondensadores en plantas de generación fotovoltaica. Sist eléctricos y electrónicos Potencia (PE&ES), Univ Extrem Badajoz, España, 1-6.
- [5] Llorca Piqué, J. (2010). El hidrógeno y nuestro futuro energético. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [6] Campillo, R. M., & Generación, I. (2010). El almacenamiento de energía en sistemas eléctricos de potencia: centrales hidroeléctricas reversibles. De Iberdrola.
- [7] José A.Roca (2017). Las 10 mayores centrales hidroeléctricas de bombeo del mundo. El periódico de la energía.
- [8] Yang, C. J., & Jackson, R. B. (2011). Opportunities and barriers to pumped-hydro energy storage in the United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 839-844.
- [9] Rigaud Gálvez, M. (2014). Almacenamiento de aire comprimido en formaciones geológicas subterráneas.
- [10] Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., & Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in natural science*, 19(3), 291-312.
- [11] Rodríguez Ortiz, D. P. (2020). *Evaluación de supercondensadores como sistema de almacenamiento para microrredes* (Bachelor's thesis).
- [12] (Vazquez et al. 2010)
- [13] (Los Supercondensadores Y Su Viabilidad Como Sistema De, Clara Pérez Lobo Tutor, and Isidoro Lillo Bravo n.d.)
- [14] Llorca Piqué, J. (2010). El hidrógeno y nuestro futuro energético. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [15] Barbón Núñez, A. (2018). Análisis de ventajas e inconvenientes de las baterías de flujo redox frente a las baterías de iones de litio en aplicaciones de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica.
- [16] Vazquez, S., Lukic, S. M., Galvan, E., Franquelo, L. G., & Carrasco, J. M. (2010). Energy storage systems for transport and grid applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(12), 3881-3895.
- [17] Li, Y., & Dai, H. (2014). Recent advances in zinc–air batteries. *Chemical Society Reviews*, 43(15), 5257-5275.
- [18] Luque Solanich, E. (2019). *Modelització de bateries de liti per a determinar el seu envelliment* (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).

- [19] Islam, M. S., & Fisher, C. A. (2014). Lithium and sodium battery cathode materials: computational insights into voltage, diffusion and nanostructural properties. *Chemical Society Reviews*, 43(1), 185-204.
- [20] Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., & Yushin, G. (2015). Li-ion battery materials: present and future. *Materials today*, 18(5), 252-264.
- [21] Zhu, G. N., Wang, Y. G., & Xia, Y. Y. (2012). Ti-based compounds as anode materials for Li-ion batteries. *Energy & Environmental Science*, 5(5), 6652-6667.
- [22] Koohi-Fayegh, S., & Rosen, M. A. (2020). A review of energy storage types, applications and recent developments. *Journal of Energy Storage*, 27, 101047.
- [23] Weber, A. Z., Mench, M. M., Meyers, J. P., Ross, P. N., Gostick, J. T., & Liu, Q. (2011). Redox flow batteries: a review. *Journal of Applied Electrochemistry*, 41(10), 1137.
- [24] Hernández Romero, A. (2016). Análisis económico de un sistema de almacenamiento para la disminución de desvíos de producción en un parque eólico.
- [25] Sabihuddin, S., Kiprakis, A. E., & Mueller, M. (2015). A numerical and graphical review of energy storage technologies. *Energies*, 8(1), 172-216.
- [26] Li, M., Lu, J., Chen, Z., & Amine, K. (2018). 30 years of lithium-ion batteries. *Advanced Materials*, 30(33), 1800561.
- [27] Urbonaite, S., Poux, T., & Novák, P. (2015). Progress towards commercially viable Li-S battery cells. *Advanced Energy Materials*, 5(16), 1500118.
- [28] Li, Y., Yang, J., & Song, J. (2017). Nano energy system model and nanoscale effect of graphene battery in renewable energy electric vehicle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 652-663.
- [29] Vazquez, S., Lukic, S. M., Galvan, E., Franquelo, L. G., & Carrasco, J. M. (2010). Energy storage systems for transport and grid applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(12), 3881-3895.
- [30] Zakeri, B., & Syri, S. (2015). Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. *Renewable and sustainable energy reviews*, 42, 569-596.
- [31] Moreno Yerro, M. (2020). *Modelado, dimensionamiento y aplicación de una batería de flujo redox de vanadio* (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).

## 7.2.- WEBS

Iberdrola.

<https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/almacenamiento-de-energia-eficiente>

Ecointeligencia (07/2013).

<https://www.ecointeligencia.com/2013/07/almacenar-energia-comprimiendo-aire/>

Red eléctrica

<https://www.ree.es/es/red21/almacenamiento-energetico>

Pontificia Universidad Católica de Chile

<http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno12/almacenaernc/page8.html>

Energetica21.com

<http://energetica21.com/noticia/la-primera-instalacion-de-almacenamiento-termico-de-energia-electrica-con-piedras-volcanicas-entra-en-funcionamiento>

Energystorageforum.com

<https://energystorageforum.com/news/sunvault-unveils-1000f-graphene-supercapacitor>

Youtube.com

<https://www.youtube.com/watch?v=I6EKAH0b69s>

La batería de plomo ácido para uso industrial

<http://labateriadeplobo.blogspot.com/2009/08/proceso-electro-quimico-de-carga-y.html>

Brighusn.com

<http://www.brighsun.com/Ch/NewsView.asp?ID=44>

OVEMS universidad politécnica de comilla

<https://evobservatory.iit.comillas.edu/>

### 7.3.- VÍDEOS

Aprende ingeniería. Batería ion de litio <https://www.youtube.com/watch?v=ydCfLFJqaBw>

Revista RD Energía <https://www.youtube.com/watch?v=8K1UYwVXQ2I>.

Anxo Sánchez Bermúdez <https://www.youtube.com/watch?v=l6EKAH0b69s>